

**UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA**  
**SEDE QUITO**

**CARRERA:**  
**INGENIERÍA ELECTRÓNICA**

**Trabajo de titulación previo a la obtención del título de:**  
**INGENIEROS ELECTRÓNICOS**

**TEMA:**  
**IMPLEMENTACIÓN DE UN CONTROL PREDICTIVO GENERALIZADO**  
**(GPC) DE LA VARIABLE CAUDAL, EN LA PLATAFORMA DE**  
**PROCESOS CONTINUOS, UTILIZANDO UN PAC**

**AUTORES:**  
**MICHAEL ÁNGELO ABAD GUZMÁN**  
**CRISTIAN MARCELO FLORES PAILLACHO**

**TUTOR:**  
**WILLIAM MANUEL MONTALVO LÓPEZ**

**Quito, julio del 2018**

## **CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR**

Nosotros, Michael Ángel Abad Guzmán, con documento de identificación No. 171731021-1 y Cristian Marcelo Flores Paillacho, con documento de identificación No. 172407078-2, manifestamos nuestra voluntad y cedemos a la Universidad Politécnica Salesiana la titularidad sobre los derechos patrimoniales en virtud de que somos autores del trabajo de titulación intitulado “IMPLEMENTACIÓN DE UN CONTROL PREDICTIVO GENERALIZADO (GPC) DE LA VARIABLE CAUDAL, EN LA PLATAFORMA DE PROCESOS CONTINUOS, UTILIZANDO UN PAC”, mismo que ha sido desarrollado para optar por el título de Ingenieros Electrónicos, en la Universidad Politécnica Salesiana, quedando la Universidad facultada para ejercer, plenamente, los derechos cedidos anteriormente.

En aplicación a lo determinado en la Ley de Propiedad Intelectual, en nuestra condición de autores nos reservamos los derechos morales de la obra antes citada. En concordancia, suscribimos este documento en el momento que hacemos entrega del trabajo final en formato impreso y digital a la Biblioteca de la Universidad Politécnica Salesiana.



Michael Ángel Abad Guzmán  
C.I. 171731021-1



Cristian Marcelo Flores Paillacho  
C.I. 172407078-2

Quito, julio 2018.

## **DECLARATORIA DE COAUTORÍA DEL DOCENTE TUTOR**

Yo, Ing. William Manuel Montalvo López declaro que bajo mi dirección y asesoría fue desarrollado el trabajo de titulación “IMPLEMENTACIÓN DE UN CONTROL PREDICTIVO GENERALIZADO (GPC) DE LA VARIABLE CAUDAL, EN LA PLATAFORMA DE PROCESOS CONTINUOS, UTILIZANDO UN PAC”, realizado por Michael Ángel Abad Guzmán y Cristian Marcelo Flores Paillacho, obteniendo un producto que cumple con todos los requisitos estipulados por la Universidad Politécnica Salesiana para ser considerado como trabajo final de titulación.

Quito, julio 2018.



William Manuel Montalvo López  
C.I. 171278998-9

## DEDICATORIA

Dedico este trabajo a la memoria de mi abuelo José Agustín Abad Narváez, que a pesar del largo tiempo de su partida siempre lo tengo presente en mis pensamientos. Quien fue para mí, un guía, apoyo, compañía desde la niñez hasta mi juventud, un ejemplo a seguir y superar, quien inculcó en mí, a ser un hombre de bien, estudioso y responsable.

*Michael.*

Quiero dedicar este proyecto de grado a mi familia, la que siempre estuvo a mi lado en este camino de vida universitaria, mis padres, mis hermanas, Anita, que en el transcurso de todo este tiempo me dieron siempre su apoyo.

Lo más importante el amor de Dios y de mi Familia nunca me faltó y sé que nunca me faltará.

*Cristian*

## **AGRADECIMIENTO**

Agradezco a mis padres por el apoyo incondicional que siempre me han brindado, y han estado ahí compartiendo cada logro obtenido.

Al Ingeniero. William Montalvo, quien permitió que este trabajo se realizara de la mejor manera, cumpliéndolo en su totalidad todos los objetivos.

*Michael.*

Quiero agradecer con todo mi corazón a mis padres Rosa y Marcelo que siempre lucharon y luchan sin cansancio día a día, cada esfuerzo que ellos realizaron en todos estos años hoy se ve plasmado en este proyecto.

A mis hermanas que siempre fueron un apoyo muy importante en el transcurso de esta carrera universitaria.

Quiero dar las gracias a Anita que estuvo durante todos estos años, dándome ánimos y su cariño sin importar nada ni nadie.

También quiero agradecer al Ingeniero. William Montalvo, quien fue la persona quien nos supo guiar en el transcurso de este proyecto, cumpliéndolo en su totalidad todos los objetivos.

*Cristian.*

## ÍNDICE DE CONTENIDO

CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR .....	ii
DECLARATORIA DE COAUTORÍA DEL DOCENTE TUTOR .....	iii
DEDICATORIA .....	iv
AGRADECIMIENTO .....	v
RESUMEN .....	xii
ABSTRACT .....	xiii
INTRODUCCIÓN .....	xiv
CAPÍTULO 1 .....	1
ANTECEDENTES .....	1
1.1 Tema .....	1
1.2 Justificación .....	1
1.3 Planteamiento del problema .....	1
1.4 Objetivos .....	2
1.4.1 Objetivo General .....	2
1.4.2 Objetivos Específicos .....	2
1.5 Grupo beneficiario .....	2
CAPÍTULO 2 .....	3
MARCO TEÓRICO .....	3
2.1 Teoría de lazo de control .....	3
2.1.1. Lazo de control de caudal de la plataforma de procesos continuos .....	3
2.2 Dispositivos para el control de caudal .....	4
2.2.1. Servoválvula .....	4
2.2.2. Transductor electroneumático .....	5
2.2.3. Instrumento eléctrico de medición de caudal .....	5
2.2.4. Controlador de Automatización Programable (PAC) .....	6

2.2.4.1	Módulo analógico de entradas NI 9201.....	7
2.2.4.2	Módulo analógico de salida de voltaje NI 9263 .....	8
2.2.5.	Tarjeta STM32F4 discovery .....	8
2.2.6.	Librería de programación en Matlab Waijung Blockset.....	9
2.3.	Teoría de controlador predictivo.....	9
2.3.1.	Formulación Matemática del Control Predictivo Generalizado.....	10
2.4.	Teoría de identificación de sistemas .....	13
2.4.1.	Pasos para la identificación.....	13
2.5.	Indices de desempeño .....	15
2.6.	Prueba de Wilcoxon .....	15
2.7.	Ejemplos de procesos similares .....	16
2.7.1.	Algoritmo de control predictivo para una planta de flujo.....	16
2.7.2.	Desarrollo de un sistema de control predictivo.....	18
2.7.3.	Control predictivo en tanques acoplados .....	21
CAPÍTULO 3	.....	23
DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN	.....	23
3.1.	Comunicación entre LabVIEW y el PAC .....	23
3.2.	Crear proyecto en LabVIEW .....	26
3.3.	Identificación del modelo.....	29
3.3.1.	Ident de Matlab .....	31
3.4.	Desarrollo del algoritmo GPC en Matlab.....	35
3.4.1.	Creación del Bloque MPC Desing .....	36
3.5.	Simulación del modelo con el algoritmo .....	38
3.5.1.	Desarrollo del algoritmo implementado.....	39
3.6.	Descripción del HMI.....	40
3.7.	Simulación de algoritmo GPC .....	42

CAPÍTULO 4 .....	43
PRUEBAS Y RESULTADOS .....	43
4.1. Interfaz gráfica .....	43
4.2. Adquisición de datos .....	43
4.3. Modelo de función de transferencia .....	45
4.4. Registro de señales de salida .....	45
4.5. Comparación de señales simuladas vs tiempo real .....	46
4.6. Análisis de índices de desempeño .....	48
4.7. Prueba de Wilcoxon .....	50
4.7.1. Interpretación de resultados .....	51
CONCLUSIONES .....	52
RECOMENDACIONES .....	54
REFERENCIAS .....	56
ANEXOS .....	58



## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1. Representación mediante bloques.....	3
Figura 2.2. Lazo de control de caudal .....	4
Figura 2.3. Servoválvula de control de caudal .....	5
Figura 2.4. Transductor electro neumático marca Fisher.....	5
Figura 2.5. Transmisor de densidad Rosemount.....	6
Figura 2.6. PAC NI cRIO – 9073.....	7
Figura 2.7. Tarjeta STM32F4 Discovery .....	9
Figura 2.8. Pasos para identificar un sistema .....	14
Figura 2.9. Esquema de entradas y salidas.....	16
Figura 2.10. Diagrama de bloques para adquirir señales .....	17
Figura 2.11. Señal de respuesta.....	17
Figura 2.12. Esquema del reservorio.....	18
Figura 2.13. Esquema simplificado del experimento.....	19
Figura 2.14. Estructura básica del controlador predictivo .....	19
Figura 2.15. Implementación en Simulink.....	20
Figura 2.16. Respuesta del sistema .....	20
Figura 2.17. Esquema de la planta .....	21
Figura 2.18. Diagrama de bloques .....	22
Figura 2.19. Señales de respuesta .....	22
Figura 3.1. Modelo y número serial del dispositivo.....	23
Figura 3.2. Configuración de dipswitch.....	24
Figura 3.3. Configuración de adaptador de ethernet.....	24
Figura 3.4. Configuración de adaptador de red.....	25
Figura 3.5. Añadir controladores .....	25
Figura 3.6. Ventanas de instalación de complementos .....	26
Figura 3.7. Creación de un nuevo proyecto .....	27
Figura 3.8. Configuración de dispositivos y tarjetas.....	27
Figura 3.9. Añadir nuevos dispositivo .....	28
Figura 3.10. Selección de programación.....	28
Figura 3.11. Conexión con dispositivo NI cRIO-9073 .....	29
Figura 3.12 Reconocimiento de módulos.....	29
Figura 3.13. Interfaz para visualizar datos de entradas y salidas .....	30

Figura 3.14. Selección de icono Import Data.....	32
Figura 3.15. Valores experimentales de Entrada y Salida .....	32
Figura 3.16. Herramienta de identificación de sistema.....	33
Figura 3.17. Ventana de configuración de entrada y salidas.....	33
Figura 3.18. Se muestra la ubicación de los datos almacenados.....	34
Figura 3.19. Selección de modelo de función de transferencia.....	34
Figura 3.20. Configuración de la función de transferencia.....	35
Figura 3.21. Flujograma del algoritmo GPC en MATLAB.....	36
Figura 3.22. Creación de bloque MPC Design .....	36
Figura 3.23. Selección de la variable GPC .....	37
Figura 3.24. Variables a emplear .....	37
Figura 3.25. Anexo de MPC Controller a pantalla de programación.....	38
Figura 3.26. Diagrama de bloques de programación .....	38
Figura 3.27. Simulación de señal de salida con un Set Point de 60%.....	39
Figura 3.28. Bloque MPC con carga de algoritmo.....	39
Figura 3.29. Escalamiento de entradas y salidas.....	40
Figura 3.30. Elementos que intervienen en el proceso de control .....	41
Figura 3.31. Flujograma de algoritmo GPC.....	42
Figura 4.1. Interfaz gráfica para observar los valores de entrada y salida.....	43
Figura 4.2. Algoritmo para registrar valores de entrada y salida del proceso.....	44
Figura 4.3. Señal de respuesta con Set Point de 3% .....	45
Figura 4.4. Señal de respuesta con Set Point de 27% .....	46
Figura 4.5. Señal de respuesta con Set Point de 54% .....	46
Figura 4.6. Respuesta del sistema con Set Point de 80 en tiempo real .....	47
Figura 4.7. Respuesta del sistema simulado con Set Point en 81%.....	47

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2.1. Índices de desempeño .....	15
Tabla 3.1. Registro de datos de entrada y salida de la planta.....	31
Tabla 3.2. Descripción de comandos .....	35
Tabla 3.3. Ubicación de elementos .....	41
Tabla 4.1. Registro de índices de desempeño con $\lambda=0$ .....	48
Tabla 4.2. Registro de índices de desempeño con $\lambda=1$ .....	49
Tabla 4.3. Prueba de Wilcoxon .....	50

## RESUMEN

El siguiente proyecto pretende emplear una de las técnicas de control modernas que han permitido marchar en consonancia con los requerimientos que surgen día a día, conforme a la evolución del mercado y las estrictas exigencias marcadas por normativas para el cumplimiento de altos estándares de calidad. Por tal razón se necesitó evolucionar a nuevos controladores como aquellos que utilizan algoritmos predictivos fundamentados en modelos matemáticos del sistema a controlar, lo más cercano a su realidad, con una adecuada estimación del retardo que introduce en el sistema. En el proyecto se realizó, la implementación de un Control Predictivo Generalizado de la variable caudal, en el Laboratorio de Teoría de Control de la Universidad Politécnica Salesiana, Sede Quito, en el cual se localiza la plataforma de entrenamiento de procesos continuos, la cual permite el desarrollo práctico de procesos industriales a nivel educativo, mediante el control de tres variables: nivel, temperatura y caudal. Este módulo dispone de actuadores y sensores, en los cuales es necesario realizar pruebas de calibración y funcionamiento para desarrollar cualquier tipo de control. Se determinó el modelo matemático del proceso de caudal de la plataforma, estableciendo la comunicación entre el software de LabVIEW y el controlador de automatización programable. Se obtuvieron datos del controlador mediante la variación de los parámetros de  $\lambda$ , horizonte de control y predicción, estos permiten analizar el comportamiento del proceso de caudal. El análisis se efectuó mediante índices de desempeño y a través de la prueba de Wilcoxon de suma de rangos de diferencias.

**PALABRAS CLAVES:** Control automático, Controlador de Automatización Programable (PAC), Controlador Predictivo Generalizado (GPC), plataforma de procesos continuos, prueba de Wilcoxon.

## ABSTRACT

The following project intends to use one of the modern control techniques that have allowed marching in accordance with the requirements that arise every day, according to the evolution of the market and the strict requirements set by regulations for the compliance with high quality standards. For this reason, it was necessary to evolve new controllers such as those who use predictive algorithms based on mathematical models of the system to controlled, as close as possible to their reality, with an adequate estimate of the delay introduced into the system. In the project, the implementation of a Generalized Predictive Control of the caudal variable was carried out in the Control Theory Laboratory of the Salesian Polytechnic University, Quito Headquarters, where the continuous process training platform is located, which allows the practical development of industrial processes at an educational level, by controlling three variables: level, temperature and flow. This module has actuators and sensors, in which it is necessary to perform calibration and operation tests to develop any type of control. The mathematical model of the flow process of the platform was determined, establishing the communication between the LabVIEW software and the programmable automation controller. Controller data was obtain by varying the parameters of  $\lambda$ , control horizon and prediction; these allow analyzing the behavior of the flow process. The analysis of the data were carried out through performance indices and through the Wilcoxon test

**KEY WORDS:** Automatic control, Programmable Automation Controller (PAC), Generalized Predictive Control (GPC), Continuous process-training platform, Wilcoxon signed-rank test.

## INTRODUCCIÓN

En el sector industrial es necesario optimizar recursos para producir productos más competitivos, en este contexto en las industrias ecuatorianas se incorporan sistemas de control convencionales, como el controlador Proporcional Integral Derivativo, convirtiéndose en la herramienta esencial para que, sí se produce una desviación fuera de los rangos establecidos se aplique una acción correctora al elemento final de regulación para obligar a la variable retornar a su valor establecido. Pero estos controladores clásicos son difíciles de diseñar y ajustar debido a la complejidad en obtener el modelamiento matemático. Por tal razón se necesita evolucionar a nuevos controladores, como aquellos que utilizan algoritmos predictivos fundamentados en modelos matemáticos del sistema a controlar, lo más cercano a su realidad, con una adecuada estimación del retardo que introduce en el sistema.

En el capítulo 1, se detalla la información relativa al tema, la justificación, el planteamiento del problema, el objetivo general y los objetivos específicos del Control Predictivo Generalizado de la variable caudal.

En el capítulo 2, contiene la teoría del lazo de control, el estudio y descripción del sistema, teoría del controlador predictivo, la teoría de identificación de sistemas y características principales acerca del Controlador de Automatización Programable (PAC), y teoría sobre los índices de desempeño.

En el capítulo 3, hace énfasis en: el proceso de identificación del modelo de la planta, el desarrollo de algoritmo de Control Predictivo Generalizado (GPC), simulación virtual del algoritmo GPC y posteriormente la implementación sobre la planta repotenciada con él PAC, todo ello, basado en el análisis de las simulaciones en Matlab y/o LabVIEW.

En el capítulo 4, se describe el comportamiento de la variable caudal y la acción de control al implementarla en la plataforma de procesos continuos, realizando pruebas de funcionamiento, para finalmente obtener resultados y elaborar conclusiones y recomendaciones y así permitir su posterior implementación física en el campo industrial.

# **CAPÍTULO 1**

## **ANTECEDENTES**

En el presente capítulo se detalla todo lo relativo al tema, justificación, delimitaciones, planteamiento del problema, objetivo general, objetivos específicos relativos al proyecto a desarrollarse.

### **1.1 Tema**

Implementación de un Control Predictivo Generalizado (GPC) de la variable caudal, en la plataforma de procesos continuos, utilizando un PAC.

### **1.2 Justificación**

Los dispositivos lógicos junto con el control predictivo han sido utilizados en controles automáticos, permitiendo manipular y procesar datos sin intervención de un operador, facilitando la detección de fallas y prevención de posibles errores en tiempo real. Los controladores predictivos permiten el control de entradas y salidas múltiples, basándose en una estrategia de control de enfoque centralizado, es decir todas las variables son consideradas simultáneamente. De igual forma compensa las demoras del proceso, debido a perturbaciones, y se aplica en sistemas no lineales.

Existe una amplia base teórica del Controlador Predictivo Generalizado (GPC), pero aún no se ha implementado en el sector industrial ecuatoriano, es por eso que se pretende desarrollar e implementar el algoritmo predictivo para el control de la variable caudal, utilizando un (PAC), en la plataforma de procesos continuos del laboratorio de Teoría de Control de la Universidad Politécnica Salesiana sede Quito-Campus Sur.

### **1.3 Planteamiento del problema**

Los controladores clásicos que actualmente son implementados en el sector industrial, como es el uso del controlador PID, no garantiza el control del sistema o estabilidad del mismo en forma óptima, generando pérdidas en cada proceso que se realiza, por lo cual se debería pensar en nuevas soluciones para obtener una mayor eficiencia en un proceso industrial, y así beneficiar directamente a la

economía nacional y privada en el Ecuador. Por medio del uso de controladores modernos predictivos, como es el caso del Controlador Predictivo Generalizado (GPC), implementado en el Controlador de Automatización Programable (PAC). En el presente proyecto se pretende optimizar el funcionamiento de la variable caudal, en la plataforma de entrenamiento de procesos continuos, para reducir el error en los tiempos de estabilización.

¿Se puede implementar controladores predictivos para optimizar los procesos industriales en el Ecuador?

## **1.4 Objetivos**

### **1.4.1 Objetivo General**

Implementar un Control Predictivo Generalizado (GPC) en la plataforma de entrenamiento de procesos continuos, para el control de la variable caudal, utilizando un Controlador de Automatización Programable (PAC).

### **1.4.2 Objetivos Específicos**

- Analizar el principio de funcionamiento de la plataforma de procesos continuos existente en el laboratorio de Teoría de Control, para el estudio de la variable caudal.
- Repotenciar la plataforma de procesos continuos mediante el Controlador de Automatización Programable (PAC) para la implementación del algoritmo de Control Predictivo Generalizado (GPC).
- Determinar el modelo matemático del proceso de caudal para simular el comportamiento del algoritmo de Control Predictivo Generalizado (GPC).
- Verificar el comportamiento real de la variable caudal, para el análisis y comprensión de resultados del Control Predictivo Generalizado (GPC).

## **1.5 Grupo beneficiario**

Los beneficiarios del trabajo de titulación, son los estudiantes de la carrera de Electrónica y el grupo de investigación en Electrónica Control y Automatización.



## CAPÍTULO 2

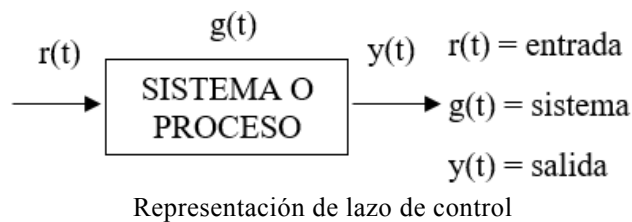
### MARCO TEÓRICO

En este capítulo se realiza una breve descripción sobre los conceptos básicos de los elementos que intervienen en el proyecto. La fundamentación teórica está basada en la recopilación de información de diferentes libros técnicos y documentación en páginas Web.

#### 2.1 Teoría de lazo de control

Un sistema de control consta de subsistemas y procesos o plantas, que se ensamblan con el propósito de obtener, una salida deseada con un rendimiento deseado, dado una entrada específica. El sistema puede ser controlado si se aplica una señal de entrada denominada  $r(t)$  para generar una salida  $y(t)$ , ilustrada en la Figura 2.1:

Figura 2.1. Representación mediante bloques



Existen dos tipos de sistemas de lazo abierto y lazo cerrado. Su uso depende en el tipo de control que se desee obtener y de su salida. (Gaviño, 2010)

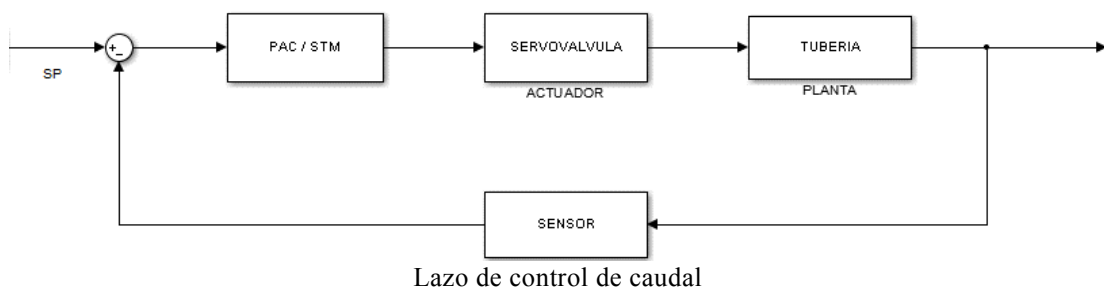
##### 2.1.1. Lazo de control de caudal de la plataforma de procesos continuos

El lazo utilizado para el control del caudal en la plataforma de procesos continuos es un lazo cerrado, porque la realimentación en el sistema permite comparar el error de salida con el valor de entrada en el Set Point y determinar una estrategia de control, para corregir el proceso y tener un control más preciso de la variable controlada.

La estrategia de control para la variable de caudal consiste en efectuar variaciones en el Set Point de la interfaz de LabVIEW, mostrada en la Figura 4.1, el controlador de automatización programable (PAC) enviará un dato a la tarjeta STM32F4 discovery, la cual envía una señal de activación al transductor electroneumático, este a su vez envía una señal de 4-20 mA, para activar un porcentaje en la apertura o cierre de la servovalvula, el algoritmo predictivo implementado para el control del proceso, buscará igualar el parámetro de salida con la referencia inicial en un corto tiempo de estabilización, la retroalimentación viene dada por el instrumento eléctrico de medición de caudal, el cual mide el porcentaje de flujo que está circulando en ese momento por la tubería, el proceso de caudal debe ajustarse a cualquier cambio en el Set Point, o a cualquier perturbación externa que se produzca, para que el sistema controlado por el algoritmo predictivo generalizado sea óptimo.

A continuación, se presenta el lazo de control cerrado de caudal, de la plataforma de procesos continuos, en la Figura 2.2.

Figura 2.2. Lazo de control de caudal



## 2.2 Dispositivos para el control de caudal

### 2.2.1. Servoválvula

En la Figura 2.3, se muestra la servoválvula que convierte comandos eléctricos en caudal o presión, consiste en un diafragma con resorte que trabaja con presión de aire 3 – 15 psi, en el cual, al aplicar una cierta presión sobre el diafragma, el resorte se comprime, haciendo que el mecanismo empiece a moverse.

Para el proceso a controlar se utiliza la servoválvula marca Fisher cuyas características eléctricas se detallan en el Anexo 1. (Hidraulica & Neumatica, 2015)

Figura 2.3. Servoválvula de control de caudal



Servoválvula de control de caudal

### 2.2.2. Transductor electroneumático

En la Figura 2.4, se muestra el transductor electroneumático a emplearse, los transductores reciben una señal de entrada de corriente continua y para convertir la señal usan un motor de par, una aleta de boquilla y un relé neumático, en una señal de salida neumática proporcional. En donde la presión de la boquilla, que opera el relé, este conecta al fuelle de retroalimentación del motor de par. Para proporcionar una comparación entre la señal de entrada y la presión de la boquilla corrigiendo los errores que se generan en la presión de la boquilla (FISHER, 2016). En el Anexo 2, se incluyen las características técnicas.

Figura 2.4. Transductor electro neumático marca Fisher



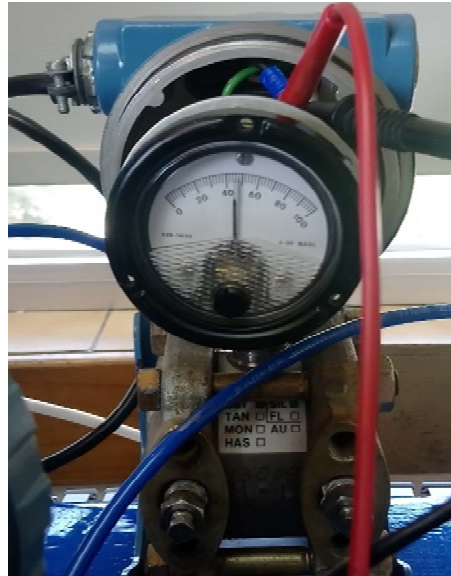
Transductor electro neumático marca Fisher

### 2.2.3. Instrumento eléctrico de medición de caudal

En la Figura 2.5, se muestra el sensor para medir caudal, el cual consta de dos mangueras una de entrada y otra de salida de flujo de agua, su funcionamiento está basado en la diferencia de presiones entre las dos tuberías.

Dicha diferencia es captada por el sensor, y se muestra en valores analógicos. (Rosemount, 2015) En el Anexo 3, se detalla información técnica.

Figura 2.5. Transmisor de densidad Rosemount



Transmisor de densidad Rosemount.

#### **2.2.4. Controlador de Automatización Programable (PAC)**

Varias de las PC comunes, e incluso varias computadoras de uso industrial, no cumplen con la demanda que exige en cierto caso los procesos de automatización industrial. En el tiempo actual se puede hacer uso de controladores los cuales ofertan una hibridación entre una PC y el PLC. Los expertos de la industria ARC optaron en usar el nombre de controladores de automatización programables (PAC) para denominarlos. Estos disponen de los rasgos de la PC, donde destacan el procesador, la memoria RAM, y un software robusto, sin dejar a un lado las características esenciales de un PLC. Estas nuevas plataformas son perfectas para control en ambientes robustos, destacando varios aspectos de la PC que en un PLC serían imposibles de implementar.

Para repotenciar la parte análoga del controlador se dispone de módulos de entradas y salidas análogas de 16 bits con acondicionamiento de sus señales para lograr un mayor grado de precisión y de exactitud al momento de realizar mediciones y controles análogos.

Para el desarrollo del presente proyecto se utilizará el PAC NI cRIO – 9073, que se muestra en la Figura 2.6. Se eligió este sistema embebido debido a sus características eléctricas, de instalación, etc., que se detallan en el Anexo 5. (INSTRUMENTS, PAC Combina la Robustez del PLC y la Funcionalidad de la PC , 2018)

Figura 2.6. PAC NI cRIO – 9073



PAC NI cRIO – 9073.

El PAC utiliza módulos de entrada y salida analógicos como son los siguientes módulos:

#### **2.2.4.1 Módulo analógico de entradas NI 9201**

Las señales de entrada se escanean, se almacenan en búfer, se acondicionan y luego se toman muestras con un solo ADC de 12 bits. Se puede conectar señales de voltaje de terminación única al NI 9201/9221. Se conecta el cable positivo de la señal de voltaje a AI y se conecta la señal de tierra a COM. Cada canal tiene un terminal o pin AI al que puede conectar una señal de voltaje. El terminal común o pin, COM está conectado internamente a la referencia de tierra aislada del módulo. Los canales NI 9201/9221 están aislados de otros módulos en el sistema. El módulo protege cada canal contra sobretensiones.

El NI 9201/9221 tiene un conector con 10 terminales desmontables, viene integrado con un DSUB que posee un conector DSUB de 25 pines. Si una aplicación que utiliza el NI 9201/9221 con terminal de tornillo está sujeta a una vibración alta, National Instruments recomienda que use punteras para terminar los cables en el desmontable conector de terminal de tornillo o use el kit de carcasa NI 9932 para proteger las conexiones.

#### **2.2.4.2 Módulo analógico de salida de voltaje NI 9263**

Las señales de entrada se escanean, se almacenan en búfer, se acondicionan y luego se toman muestras con un solo ADC de 12 bits. Se puede conectar señales de voltaje de terminación única al NI 9201/9221, conectando el cable positivo de la señal de voltaje a AI y conectando la señal de tierra a COM.

El NI 9201/9221 tiene un conector con 10 terminales de tornillo desmontable. El NI 9201/9221 con DSUB tiene un conector DSUB de 25 pines. Cada canal tiene un terminal o pin AI al que puede conectar una señal de voltaje. COM, el terminal o pin común, está conectado internamente a la referencia de tierra aislada del módulo. Los canales NI 9201/9221 están aislados de otros módulos en el sistema. El módulo protege cada canal contra sobretensiones.

Nota.- Debe usar dos terminales para crear una conexión segura cuando conecte más de un cable a un solo terminal en el NI 9201/9221, con terminal de tornillo.

Cableado para aplicaciones de alta vibración Si una aplicación que utiliza el NI 9201/9221 con terminal de tornillo está sujeta a vibraciones altas, National Instruments recomienda que usted usa casquillos para terminar cables en el desmontable. (INSTRUMENTS, OPERATING INSTRUCTIONS AND SPECIFICATIONS, 2009)

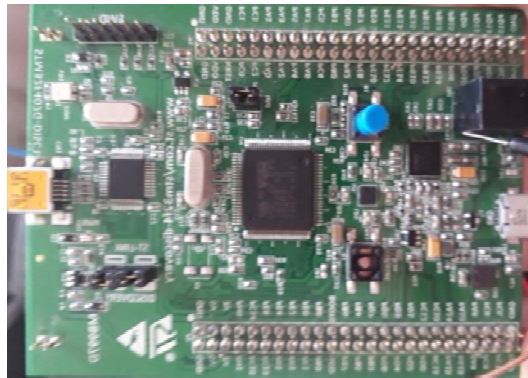
#### **2.2.5. Tarjeta STM32F4 discovery**

En la Figura 2.7, se muestra la tarjeta STM32F4 DISCOVERY, que se emplea para la obtención de valores de entrada y salida de la planta, en tiempo real se emplea el kit de desarrollo STM32F4 DISCOVERY de bajo costo, el cual emplea un Microcontrolador de alto rendimiento STM32F40YVG.

Es de fácil desarrollo de aplicaciones e incluye, todas las herramientas necesarias para que los usuarios de niveles principiantes o experimentados puedan emprender rápidamente, unas de sus ventajas es el de poseer varias opciones en lenguaje de programación como es el caso de C/C++ y programación de bloques en la

plataforma Matlab, empleando la librería Waijung. Sus características técnicas se detallan en el Anexo 3. (STMicroelectronics, 2013)

Figura 2.7. Tarjeta STM32F4 Discovery



Tarjeta STM32F4 Discovery, Fuente: (STMicroelectronics, 2013)

#### **2.2.6. Librería de programación en Matlab Waijung Blockset**

La librería fue diseñada en Tailandia, la cual consiste en un bloque de Simulink, con el cual es posible generar un código C de forma fácil y automática a partir de sus modelos de simulación Matlab/Simulink para muchos tipos de microcontroladores.

Waijung es diseñado específicamente para admitir la familia de microcontroladores STM32F4, consiste en una MCU de alto rendimiento y DSP de STMicroelectronics. Waijung Blockset y STM32f4 Target, han sido repotenciados con muchas características y mejoras, que han permitido llevar a cabo aplicaciones de uso real con gran facilidad al momento de ejecutarlo. (Blockset, 2017)

#### **2.3. Teoría de controlador predictivo**

El método del Control Predictivo Generalizado (GPC) realizado por Clarke, es uno de los métodos del Control Predictivo Basado en Modelo (MPC) con gran apogeo en el ámbito industrial, así como en la parte estudiantil, se ha logrado implementar con éxito en diversos proyectos industriales, consiguiendo demostrar un buen rendimiento y con un gran grado de robustez en sus aplicaciones.

Puede ser la solución para muchos inconvenientes de control para una amplia gama de plantas las cuales requieran de cierto número de variables, que deben ser detalladas por el usuario en donde depende su capacidad de conocimiento.

La idea principal de Control Predictivo Generalizado (GPC) es calcular la sucesión de señales futuras del control de manera que reduzca una función de costo de varias etapas, definida sobre un horizonte de predicción. El índice que se optimizará es la expectativa de una función cuadrática que mida el trayecto de la salida pronosticada y alguna secuencia de referencia pronosticada sobre el horizonte más una función cuadrática que mida el esfuerzo de control, proporciona un recurso analítico, consigue tratar con plantas de fase no estables y no mínimas y concentra el horizonte de control, además también se considera los incrementos de control de ponderación en la función costo. (Bordons, 1999)

### 2.3.1. Formulación Matemática del Control Predictivo Generalizado

La mayoría de las plantas de entrada y salida única (SISO), al considerar la operación alrededor de un punto de referencia particular y después de la linealización, pueden describirse por:

$$A(z^{-1})y(t) = z^{-d}B(z^{-1})u(t-1) + C(z^{-1})e(t) \quad \text{Ec. (2.1)}$$

En el cual las variables:

$u(t)$  e  $y(t)$  son las secuencias de control y salida de la planta y  $e(t)$  viene hacer un ruido blanco. Donde los polinomios en el operador de desplazamiento hacia atrás  $z^{-1}$  son  $A$ ,  $B$  y  $C$  como se muestra a continuación en las siguientes ecuaciones:

$$A(z^{-1}) = 1 + a_1z^{-1} + a_2z^{-2} + \dots + a_naz^{-na} \quad \text{Ec. (2.2)}$$

$$B(z^{-1}) = b_0 + b_1z^{-1} + b_2z^{-2} + \dots + b_naz^{-nb} \quad \text{Ec. (2.3)}$$

$$C(z^{-1}) = 1 + c_1z^{-1} + c_2z^{-2} + \dots + c_naz^{-na} \quad \text{Ec. (2.4)}$$

En el cual  $d$  viene hacer un tiempo muerto en el controlador. Se conoce como modelo de media móvil variable autorregulada (CARMA). Para muchas aplicaciones industriales en donde las perturbaciones no vienen hacer estacionarias, es más apropiado un modelo integrado de CARMA (CARIMA).



Un modelo CARIMA es dado por:

$$A(z^{-1})y(t) = B(z^{-1})z^{-d}u(t-1) + C(z^{-1})\frac{e(t)}{\Delta} \quad \text{Ec. (2.5)}$$

Donde:

$$\Delta = 1 - z^{-1} \quad \text{Ec. (2.6)}$$

Para simplificar el polinomio C se asigna el valor de 1. El algoritmo de Control Predictivo Generalizado (GPC) radica en ejecutar una sucesión de datos de control óptimos que resten una función de costo de múltiples etapas como se muestra a continuación:

$$J(N_1, N_2, N_u) = \sum_{j=N_1}^{N_2} \delta(j) [\hat{y}(t+j|t) - w(t+j)]^2 + \sum_{j=1}^{N_u} \lambda(j) [\Delta u(t+j-1)]^2 \quad \text{Ec. (2.7)}$$

Por lo que  $\hat{y}(t+j|t)$  viene hacer una predicción óptima  $j$  de la salida del sistema en los datos hacia el tiempo  $t$ ,  $N_1$  y  $N_2$  los cuales vienen hacer los horizontes de cálculo de costos mínimo y máximo, donde  $N_u$  es definido como el horizonte de control,  $\delta(j)$  y  $\lambda(j)$  son sucesiones de peso y  $w(t+j)$  viene definida como el recorrido de referencia futura.

Para lograr mejorar la función de costo, se deberá obtener una predicción mejorada de  $y(t+j)$  para  $j \geq N_1$  y  $j \leq N_2$ . Por lo cual se debe considerar la siguiente ecuación diofántina:

$$1 = E_j(z^{-1})\tilde{A}(z^{-1}) + z^{-j}F_j(z^{-1}) \text{ con } \tilde{A}(z^{-1}) = \Delta A(z^{-1}) \quad \text{Ec. (2.8)}$$

En donde los polinomios de  $E_j$  y  $F_j$  estarán determinados de una manera única con grados  $j-1$  y  $n_a$ . Esto se puede lograr mediante una división de 1 por  $\tilde{A}(z^{-1})$  hasta que lo demás se consiga factorar como  $z^{-j}F_j(z^{-1})$ . Donde el coeficiente de la división viene hacer el polinomio  $E_j(z^{-1})$ .

Al multiplicar la ecuación (2.5) por  $E_j(z^{-1})$ , se obtiene que:

$$\tilde{A}(z^{-1})E_j(z^{-1})y(t+j) = E_j(z^{-1})B(z^{-1})\Delta u(t+j-d-1) + E_j(z^{-1})e(t+j) \quad \text{Ec. (2.9)}$$

Que puede ser reescrito como:

$$y(t+j) = F_j(z^{-1})y(t) + E_j(z^{-1})B(z^{-1})\Delta u(t+j-d-1) + E_j(z^{-1})e(t+j) \quad \text{Ec. (2.10)}$$

Como el grado de polinomio  $E_j(z^{-1}) = j - 1$ , se puede decir que los términos de ruido en la ecuación (1.11) están definidos en el futuro. En donde la mejor predicción es la de  $y(t+j)$  por lo tanto:

$$G_j(z^{-1}) = E_j(z^{-1})B(z^{-1}) \quad \text{Ec. (2.11)}$$

Para poder resolver la dificultad del GPC, el conjunto de señales de control  $u(t), u(t+1), \dots, u(t+N)$  es obtenido para optimizar la Ec. (2.7).

Como el sistema posee un tiempo muerto de  $d$  períodos en el muestreo, el sistema la salida será influenciada de manera directa por la señal  $u(t)$  después de un período de muestreo  $d+1$ .  $N_1$ ,  $N_2$  y  $N_u$  son los valores que definen el horizonte por  $N_1 = d+1$ ,  $N_2 = d+N$  y  $N_u = N$ .

Por ende, si  $N_1 > d+1$  los datos iniciales en la secuencia de referencia, son los que predijeron las acciones con la mayor certeza. (Bordons, 1999)

Se muestra el conjunto de  $j$  predicciones óptimas por delante:

$$\hat{y}(t+d+1|t) = G_{d+1}\Delta u(t) + F_{d+1}y(t) \quad \text{Ec. (2.12)}$$

$$\hat{y}(t+d+2|t) = G_{d+2}\Delta u(t+1) + F_{d+2}y(t) \quad \text{Ec. (2.13)}$$

$$\hat{y}(t+d+N|t) = G_{d+N}\Delta u(t+N-1) + F_{d+N}y(t) \quad \text{Ec. (2.14)}$$

De forma compacta se las se puede representar como:

$$y = Gu + F(z^{-1})y(t) + \hat{G}(z^{-1})\Delta u(t-1) \quad \text{Ec. (2.15)}$$

Y de forma matricial:

$$y = \begin{bmatrix} \hat{y}(t+d+1|t) \\ \hat{y}(t+d+2|t) \\ \vdots \\ \hat{y}(t+d+N|t) \end{bmatrix} \quad u = \begin{bmatrix} \Delta u(t) \\ \Delta u(t+1) \\ \vdots \\ \Delta u(t+N-1) \end{bmatrix} \quad \text{Ec. (2.16)}$$

$$G = \begin{bmatrix} g_0 & 0 & \cdots 0 \\ g_1 & g_0 & \cdots 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ g_{N-1} & g_{N-2} & g_0 \end{bmatrix} \quad \text{Ec. (2.17)}$$

$$\hat{G}(z^{-1}) = \begin{bmatrix} (G_{d+1}(z^{-1}) - g_0)z \\ (G_{d+2}(z^{-1}) - g_0 - g_1 z^{-1})z^2 \\ \vdots \\ (G_{d+N}(z^{-1}) - g_0 - g_1 z^{-1} - \cdots - g_{N-1} z^{-(N-1)})z^N \end{bmatrix} \quad \text{Ec. (2.18)}$$

$$F(z^{-1}) = \begin{bmatrix} F_{d+1}(z^{-1}) \\ F_{d+2}(z^{-1}) \\ \vdots \\ F_{d+N}(z^{-1}) \end{bmatrix} \quad \text{Ec. (2.19)}$$

En el algoritmo formulado se puede emplear la teoría física y matemática para determinarlo, sin embargo en estos días existen algoritmos computacionales muy precisos que facilitan hallar el modelo como son los Métodos de Identificación de Sistemas.

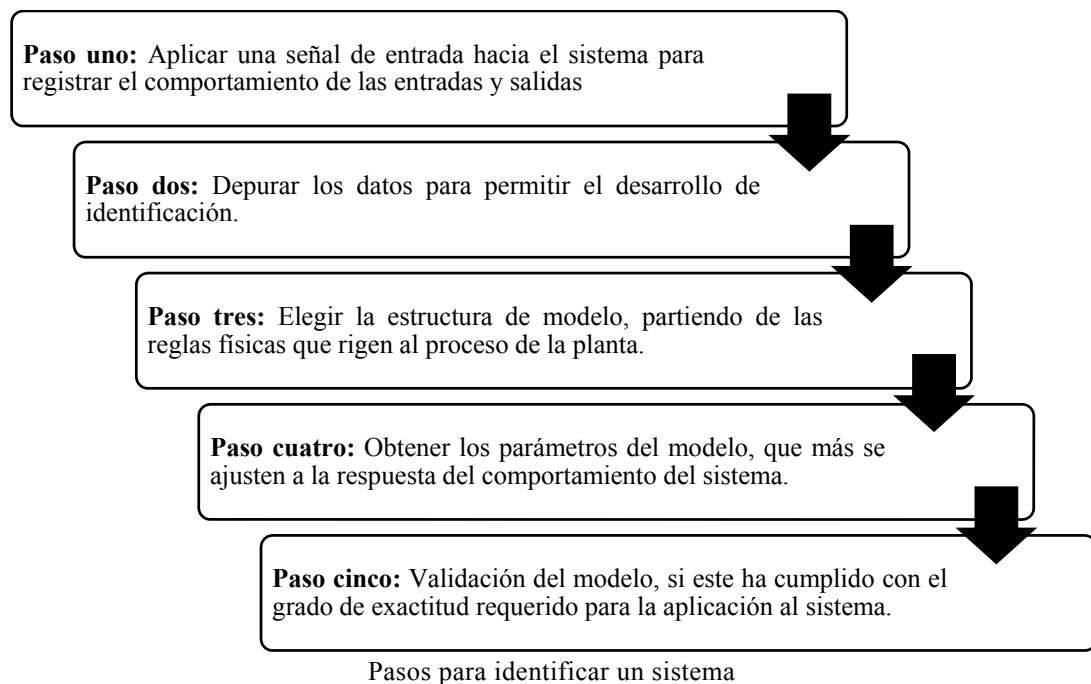
## 2.4. Teoría de identificación de sistemas

La identificación de sistemas consiste en obtener en forma de experimento un modelo matemático ya en su representación continua o discreta, de forma que se asemeje con un grado de exactitud a las cualidades dinámicas.

### 2.4.1. Pasos para la identificación

A continuación, en la Figura 2.8, se describen los pasos para identificar un sistema:

Figura 2.8. Pasos para identificar un sistema



En un caso extremo que no se cumpla con lo deseado se recomiendan los siguientes puntos a revisar:

- El conjunto seleccionado de datos de entrada y salida no proporciona suficiente información sobre la dinámica del sistema.
- La estructura seleccionada no representa a cabalidad la descripción del modelo.
- El discernimiento para la sintonización de parámetros no es el idóneo.

Cabe recalcar que este método es iterativo, debido a que será necesario repetir los pasos mencionados en caso de presentarse causas estimadas.

Hoy en día se ha mejorado la identificación de sistemas mediante el uso de herramientas de simulación como el entorno de Matlab, mediante la utilización de un Toolbox, a su vez la empresa National Instruments en sus versiones de desarrollo más recientes incluyen un ToolKit de identificación, que marcha a la par con aparatos de adquisición de datos. (Arnold & Osorio, 1998)

## 2.5. Índices de desempeño

Los índices de desempeño se definen como el valor que sirve como parámetro para evaluar la calidad, como se muestra en la Tabla 2.1.

Tabla 2.1. Índices de desempeño

INDICE	DETALLE
Máximo sobreimpulso (Mp)	Pico máximo de la señal de respuesta, que indica la estabilidad del sistema en porcentaje, se mide a partir de su valor final en estado estacionario.
Tiempo de establecimiento (tss)	Tiempo en el cual se estima que la curva de respuesta se mantenga constante dentro de un determinado rango alrededor del valor final.
Error en estado estable (ess)	Es la diferencia entre la salida y la referencia en estado estable.
Integral de Error Absoluto (IEA)	Criterio de sintonía para minimizar la integral del error en valor absoluto. Este criterio es más sensible a pequeños errores.

Índices de desempeño

## 2.6. Prueba de Wilcoxon

Esta prueba se utiliza para analizar muestras de datos mediante el diseño antes-después o el diseño pareado. Sin embargo, pueden existir otras formas de obtener dos muestras relacionadas, esta prueba es un procedimiento estadístico de significancia no paramétrico.

Esta prueba evalúa la probabilidad de que la diferencia encontrada entre dos muestras relacionadas sea únicamente debido al error de muestreo a partir de la comparación de pares y tiene la ventaja de que da más peso a las diferencias mayores. (Moore, 2000)

Esta prueba es de forma no paramétrica, se emplea a pequeñas muestras, las cuales deben estar en el rango de 6 a 25. Para mayores de 25, hay convertirla en valor de Z, para saber si la probabilidad del valor es o no significativo.

Si el tamaño  $n < 25$ , se compara el valor obtenido de W con los valores de una tabla Wilcoxon. Si el valor de W se encuentra dentro del intervalo correspondiente en la tabla para n, la diferencia no es significativa.

Si  $n > 25$  se puede asumir que  $W$  se distribuye de forma aproximadamente Normal, rechazando  $H_0$  si  $Z$  calculado es menor que el valor de  $Z$  para el  $\alpha$ . (Rodrigo, 2016)

$$z = \frac{T - \frac{n(n+1)}{4}}{\sqrt{\frac{n(n+1)(2n+1)}{24}}} \quad \text{Ec. (2.20)}$$

## 2.7. Ejemplos de procesos similares

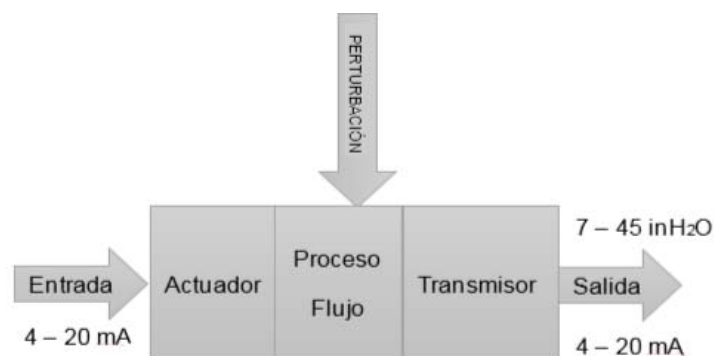
### 2.7.1. Algoritmo de control predictivo para una planta de flujo

En el año 2015, López Verónica y Paredes Alex, estudiantes de Ingeniería en Electrónica e Instrumentación de la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE en Quito, realizaron el tema:

“Diseño e implementación de un algoritmo de control predictivo para una planta de flujo utilizando un controlador de automatización programable para el laboratorio de redes industriales y control de procesos de la universidad de las fuerzas armadas ESPE extensión Latacunga.”

La planta está conformada por un sistema SISO, como señal de entrada se tiene la corriente de 4-20 mA que proviene del actuador, esta señal va al variador de velocidad cuya función es el control de la bomba además de la variable de flujo. Como señal de salida se tiene la corriente de 4-20 mA proveniente del transmisor de presión diferencial. Alguna entrada adicional a las mencionadas se contempla como una perturbación de un medio externo. A continuación, en la Figura 2.9 se muestra el esquema del proceso de flujo del sistema.

Figura 2.9. Esquema de entradas y salidas



Esquema de entradas y salidas, Fuente: (López Caisaguano & Paredes Anchatipán, 2015)



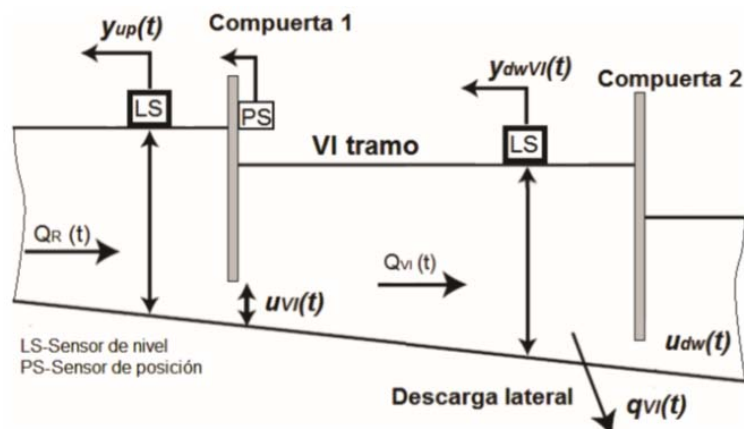
En la Figura 2.11, se logra observar un mejor tiempo de establecimiento del sistema en el control MPC y una disminución del MP en el nivel en comparación al controlador PID. (López Caisaguano & Paredes Anchatipán, 2015)

### 2.7.2. Desarrollo de un sistema de control predictivo

En el año 2011, Julio Cuenca estudiante de posgrado en Informática Industrial y Automatización del Instituto Superior Politécnico José Antonio Echeverría Cujae en Cuba, realizó el tema, “Desarrollo de un sistema de control predictivo generalizado (GPC) de la distribución de agua en el VI tramo de canal principal de riego Güira de Melena”.

Las mediciones disponibles son el nivel aguas abajo del tramo y la posición de la compuerta aguas arriba, además posee una red de medida que transmite datos mediante radio, y permite procesar y almacenar todas las variables captadas. En la Figura 2.12, se muestra un esquema con la descripción del reservorio. El sensor de nivel está instalado en un pozo de reposo, con el fin de evitar que las olas producidas por la apertura de compuertas y el movimiento del agua produzcan variaciones no deseadas en las mediciones. Este sensor presenta flotador y contrapeso, enlazados a una cinta de acero inoxidable que mueve una rueda dentada. Los movimientos de la rueda son transferidos a un potenciómetro que transmite las señales analógicas correspondientes a la variación de nivel de agua

Figura 2.12. Esquema del reservorio

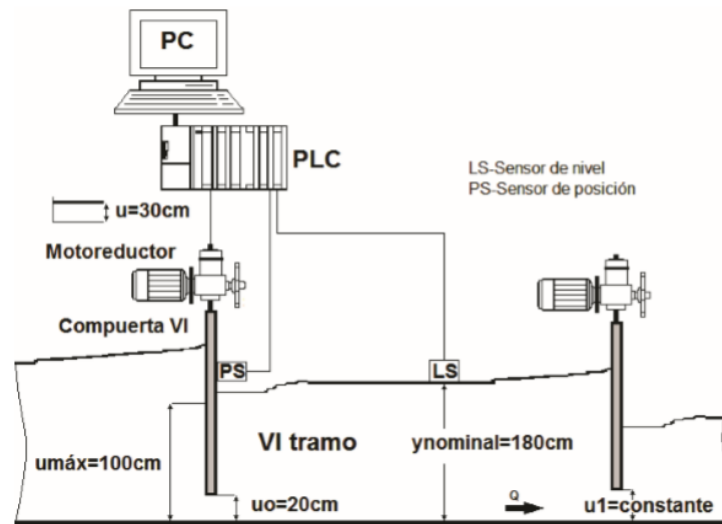


Esquema del reservorio, Fuente: (Cuenca Tinitana, 2011)



En la Figura 2.13, se muestra el diseño del experimento para obtener datos necesarios y realizar la identificación paramétrica del proceso de variación de nivel.

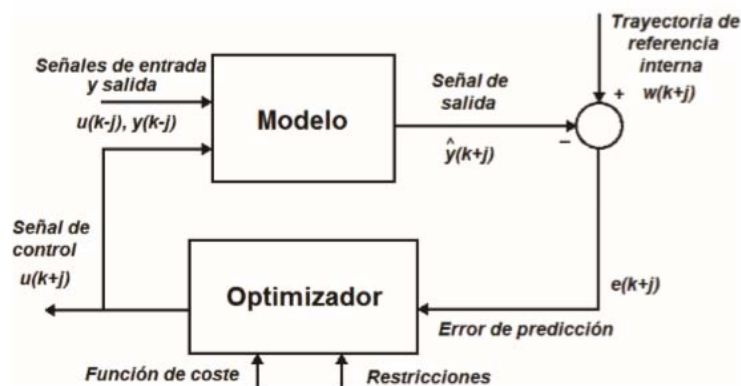
Figura 2.13. Esquema simplificado del experimento



Esquema simplificado del experimento, Fuente: (Cuenca Tinitana, 2011)

El diagrama básico del controlador predictivo basado en modelo, se muestra en la Figura 2.14. Las señales de salidas pronosticadas las obtiene el modelo en base a señales de control futuras, señales de entradas y señales de salidas pasadas, de aquí la importancia de que el modelo capture adecuadamente la dinámica del proceso. Las señales de control se obtienen considerando una función de coste y determinadas restricciones, las mismas son calculadas por el optimizador

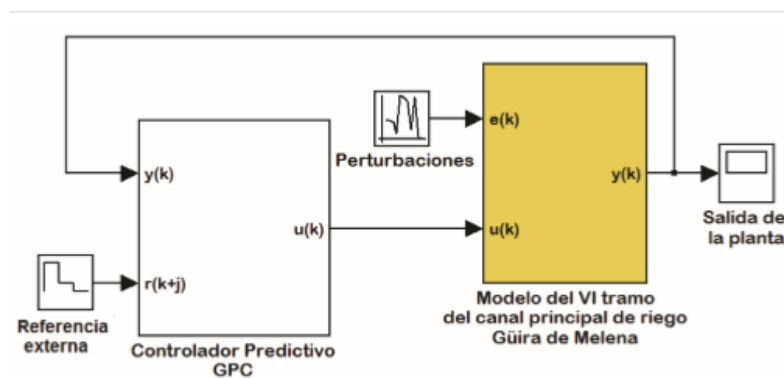
Figura 2.14. Estructura básica del controlador predictivo



Estructura básica del controlador predictivo, Fuente: (Cuenca Tinitana, 2011)

La Figura 2.15, muestra el diagrama en bloques de la implementación en Simulink del sistema de control con controlador GPC del tramo de canal de riego. Los valores de sintonía de los controladores PID y PI son cambiados en forma simultánea. El ajuste óptimo de los parámetros de los controladores se obtiene mediante la aplicación de la herramienta tune del bloque PID, el proceso se realiza hasta obtener y simular una respuesta del sistema teniendo como referencia el escalón unitario.

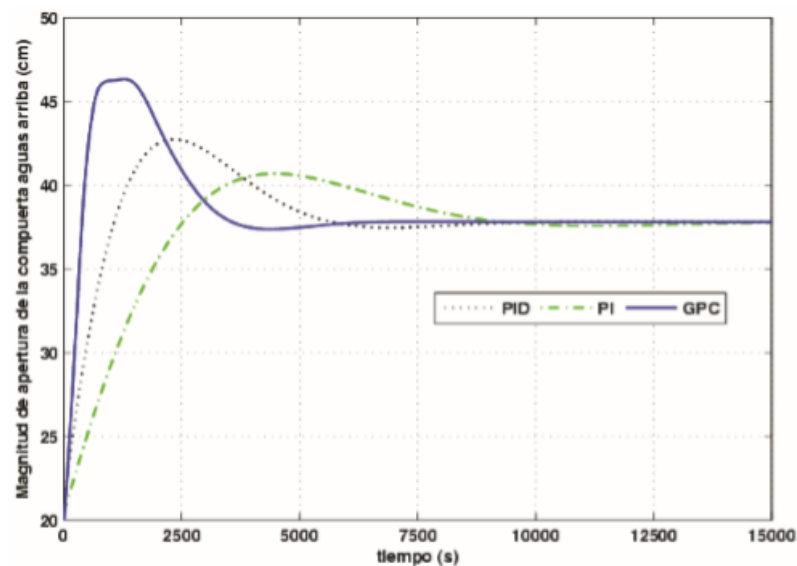
Figura 2.15. Implementación en Simulink



Implementación en Simulink, Fuente: (Cuenca Tinitana, 2011)

La Figura 2.16, muestra la señal de respuesta del sistema con controladores PID, PI y GPC.

Figura 2.16. Respuesta del sistema



Respuesta del sistema, Fuente: (Cuenca Tinitana, 2011)

Se observa en la Figura 2.16, que con el controlador GPC se tiene una mejora en el tiempo de establecimiento. (Cuenca Tinitana, 2011)

### 2.7.3. Control predictivo en tanques acoplados

En el año 2009, Moromenacho Edison, Rosero Cristina y Bravo Yadira estudiantes de Ingeniería Eléctrica y Electrónica de la Escuela Politécnica Nacional en Quito, propusieron:

Al aplicar un control predictivo a un sistema de tanques acoplados que es muy común en el sector industrial; el proceso está basado en el principio de vasos comunicantes. El propósito de este proceso es tener el control de nivel de líquido en el recipiente final.

Esto se realiza solamente a dos tanques por lo que se debe obtener la función de transferencia total de la planta, la cual está conformada por tres secciones, como indica la Figura 2.17.

- El primer bloque representa a una bomba de agua centrífuga
- El segundo bloque representa a los tanques acoplados
- El tercer bloque representa al Sensor para el nivel

Figura 2.17. Esquema de la planta



Esquema de la planta, Fuente: (Moromenacho Oscullo, Rosero Mata, & Bravi Narvárez, 2009)

A continuación, se muestra el diagrama de bloques en simulink.

Figura 2.18. Diagrama de bloques

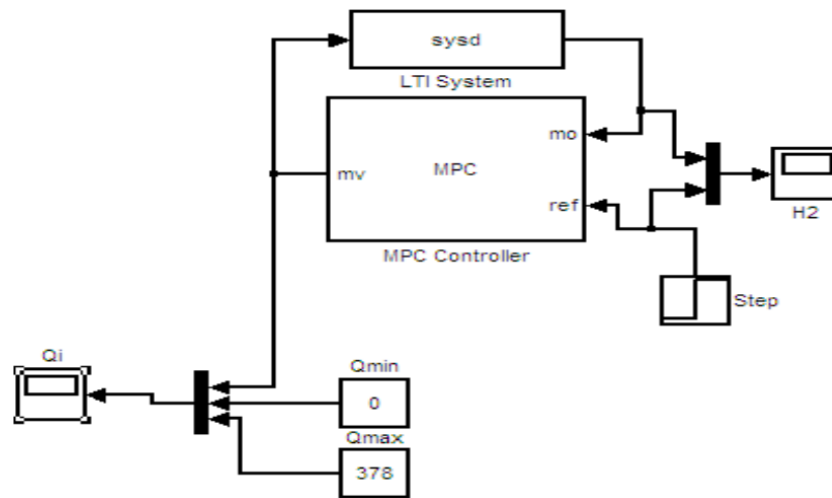
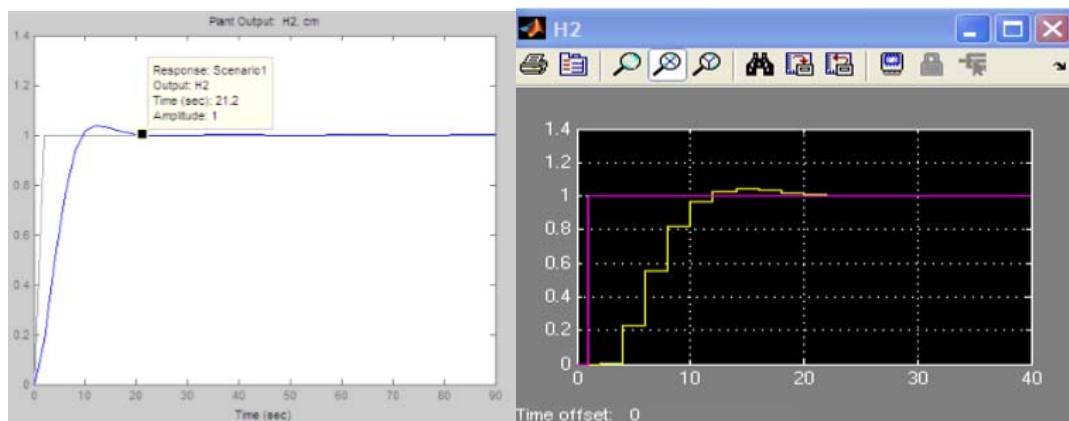


Diagrama de bloques, Fuente: (Moromenacho Oscullo, Rosero Mata, & Bravi Narváez, 2009)

Al tener los parámetros del controlador predictivo sintonizados se logran tener una respuesta paso, donde se evidencia que el tiempo de establecimiento del sistema mejora, como se muestra en la Figura 2.19., en el cual el tiempo puede ser disminuido si se minimiza el intervalo de muestreo, logrando así obtener un control violento.

Figura 2.19. Señales de respuesta



Señales de respuesta, Fuente: (Moromenacho Oscullo, Rosero Mata, & Bravi Narváez, 2009)

En la simulación se usaron parámetros previamente analizados, pero se pueden cambiar cada uno de estos parámetros para mejorar el sistema. (Moromenacho Oscullo, Rosero Mata, & Bravi Narváez, 2009)

## CAPÍTULO 3

### DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN

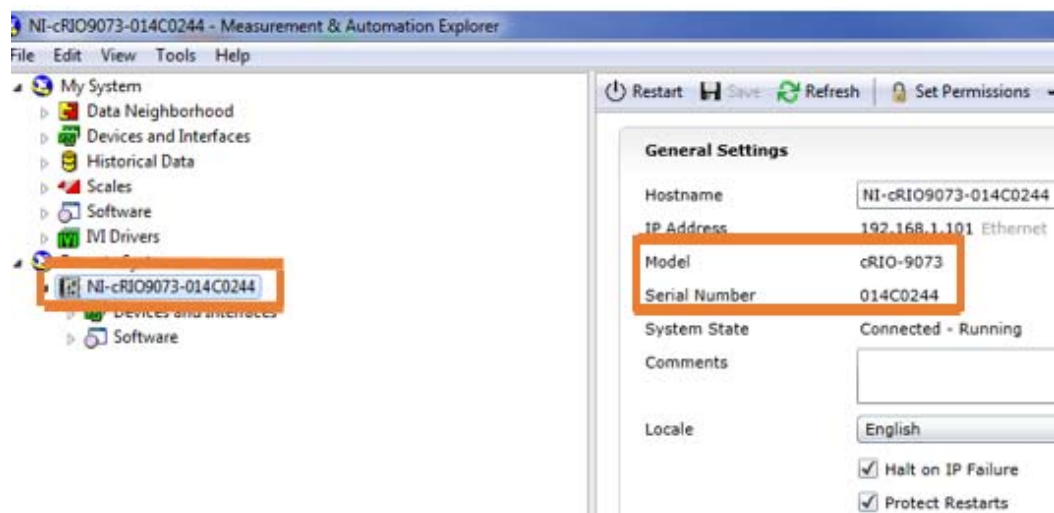
En el siguiente capítulo se presenta la identificación de modelo del sistema, obteniendo valores de entrada y salida en tiempo real, mediante la aplicación de la herramienta Ident de Matlab, para posteriormente desarrollar el algoritmo GPC, y realizar pruebas.

#### 3.1. Comunicación entre LabVIEW y el PAC

Para establecer la comunicación, se debe ingresar al explorador de medición y automatización NI MAX, con el fin de constatar que NI MAX reconozca el chasis PAC NI cRIO – 9073.

En la Figura 3.1, se muestra el modelo de PAC y número serial, que deben coincidir con el modelo y número serial del dispositivo.

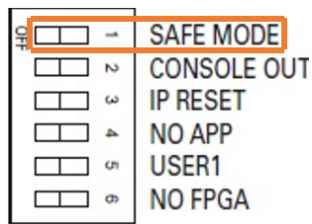
Figura 3.1. Modelo y número serial del dispositivo



Modelo y número serial del dispositivo

Una vez reconocido el chasis, se prosigue a reiniciar la configuración del dispositivo, para lo cual se emplea el dipswitch del chasis seleccionando el modo *safe mode*, como se muestra en la Figura 3.2, después se presiona el botón *reset* del chasis para reiniciar todo el sistema.

Figura 3.2. Configuración de dipswitch



Configuración de dipswitch, Fuente: (<https://forums.ni.com/t5/LabVIEW/Ni-cRIO-9073>)

Una vez reiniciado el sistema, se da clic derecho sobre el chasis para seleccionar la opción, *format disk* que permite formatear el disco, en la ventana de dialogo seleccionar *reset all of the network adapters to their default settings*, para reiniciar los adaptadores de red a sus configuraciones de inicio, terminado este proceso se desactiva el modo seguro y se prosigue a reiniciar el chasis presionando el botón *reset* del chasis.

El chasis ahora se encuentra en estado de safe mode (no software installed), se selecciona el chasis y desde la pestaña de network settings, se configura el adaptador de ethernet del dispositivo, en la Figura 3.3, se selecciona un IP estático para trabajar, la dirección IPV4: 192.168.1.101 con máscara de subred: 255.255.255.0, dirección Gateway: 0.0.0.0 y servidor DNS: 0.0.0.0, y al finalizar se guardan los cambios.

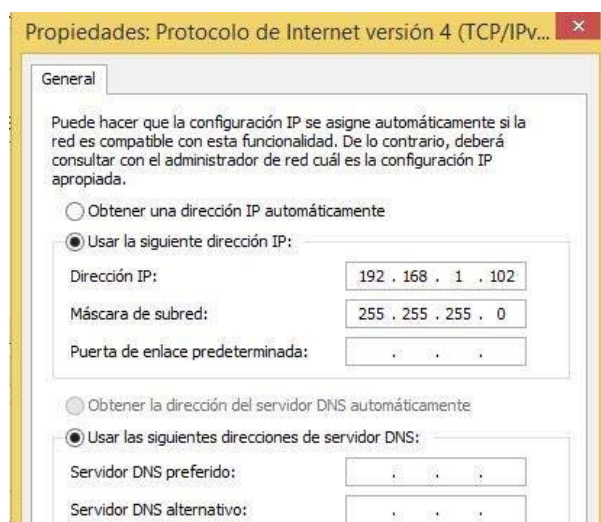
Figura 3.3. Configuración de adaptador de ethernet



Configuración de adaptador de Ethernet

Para que la comunicación se lleve a cabo, tanto el dispositivo como la PC, deben estar en la misma red de trabajo. En la Figura 3.4, se muestra la configuración de red IPV4: 192.168.1.102, con máscara de subred: 255.255.255.0.

Figura 3.4. Configuración de adaptador de red

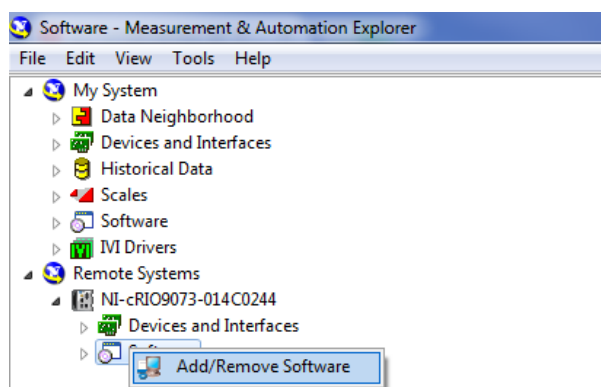


Configuración de adaptador de red

A continuación, se instala el software necesario para trabajar con él chasis.

La Figura 3.5, muestra que, el dispositivo NI-Crio9073 se encuentra sin los controladores necesarios para funcionar, para ello se selecciona de la pestaña *remote systems* la opción, *add/remove software*, para añadir los respectivos controladores.

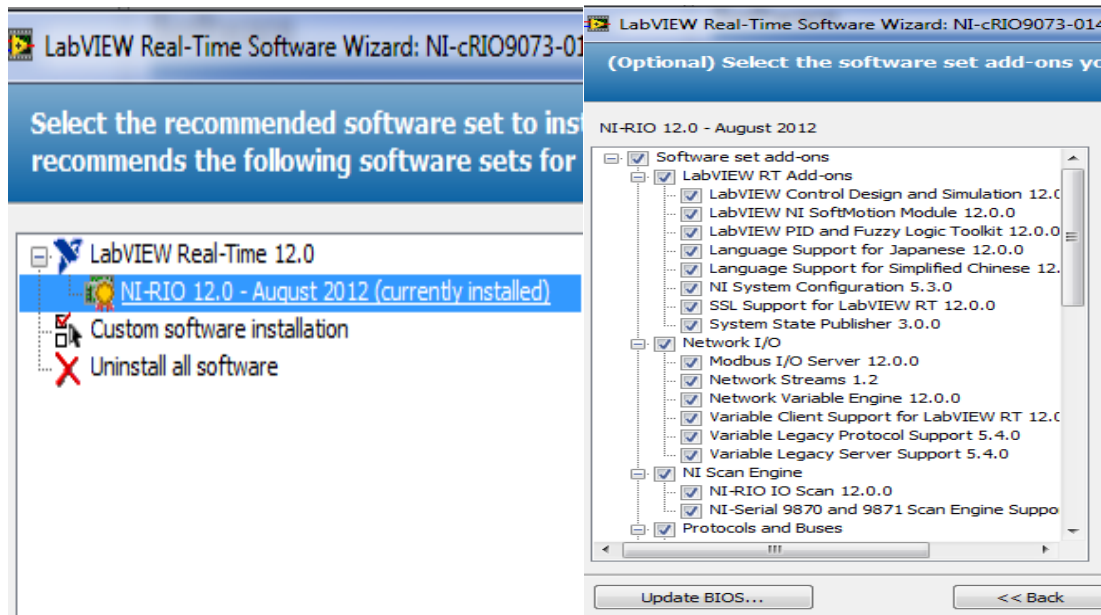
Figura 3.5. Añadir controladores



Añadir controladores

En la Figura 3.6, se muestra la ventana para instalar el software, se selecciona todos los drivers compact RIO, clic en *next* y en *addons* instalar todos los complementos que sean necesarios.

Figura 3.6. Ventanas de instalación de complementos



Ventanas de instalación de complementos

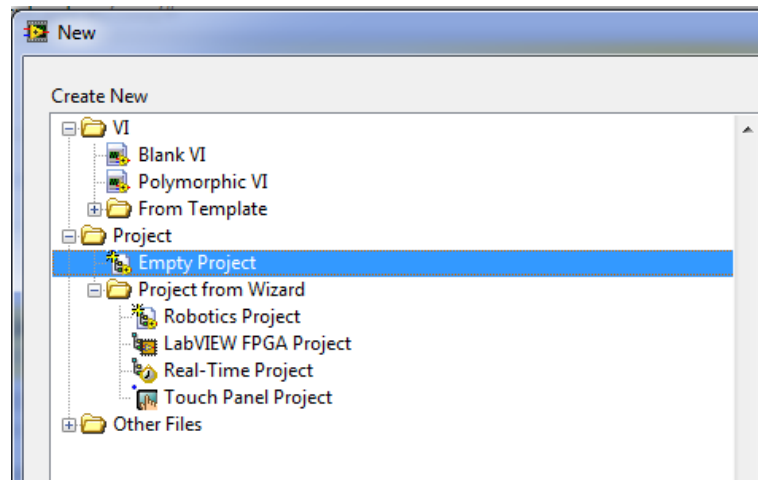
### 3.2. Crear proyecto en LabVIEW

A continuación, se muestran los pasos para crear un nuevo proyecto con el dispositivo PAC cRIO-9073.

Primero se inicia el entorno de LabVIEW. Desde la barra de menú, clic en *file* y seleccionar *new*, dentro de *project* escoger *empty project*, como se muestra en la Figura 3.7, para dar inicio a un nuevo proyecto. Clic en *OK* y se procede a guardar el archivo en el disco c.



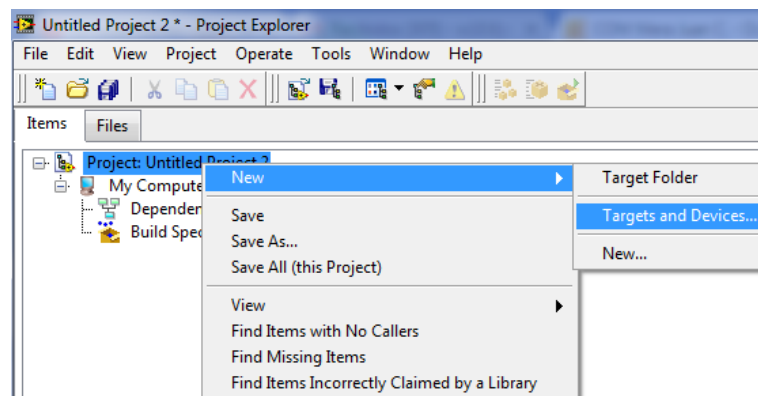
Figura 3.7. Creación de un nuevo proyecto



Creación de un nuevo proyecto.

Se despliega el explorador de proyecto, como se muestra en la Figura 3.8, está el nuevo proyecto *project: untitled project*, sobre el nombre del proyecto dar clic derecho y seleccionar *NEW*, seguido escoger la opción *targets and devices*.

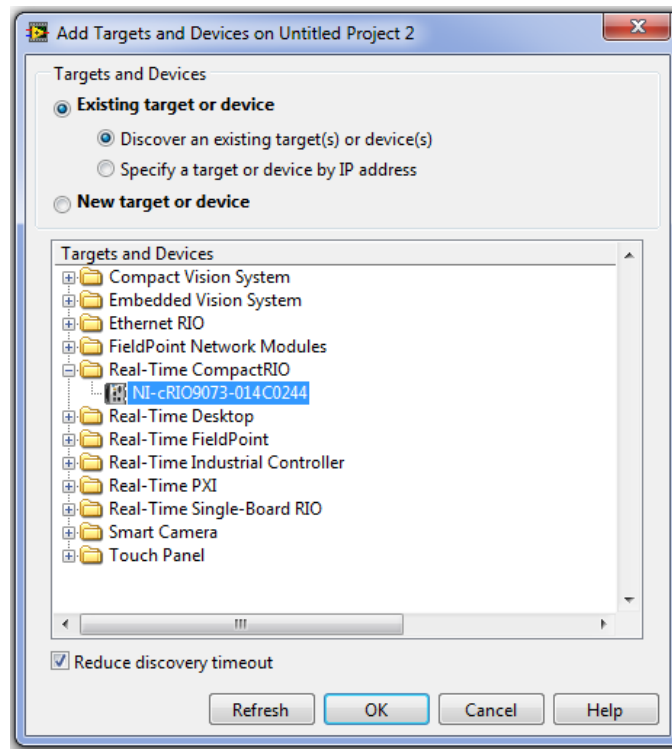
Figura 3.8. Configuración de dispositivos y tarjetas



Configuración de dispositivos y tarjetas

Escoger dentro de *targets and devices*, como se muestra en la Figura 3.9, desplegar la carpeta *real-time compactrio*. Se escoge el dispositivo *NI-cRIO9073-014C0244*, clic en aceptar.

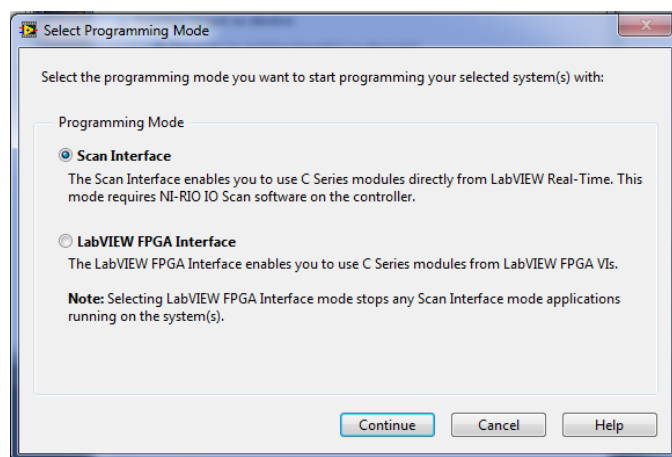
Figura 3.9. Añadir nuevos dispositivo



Añadir nuevo dispositivo

Se despliega una ventana pidiendo el tipo de programación a emplear, como se muestra en la Figura 3.10.

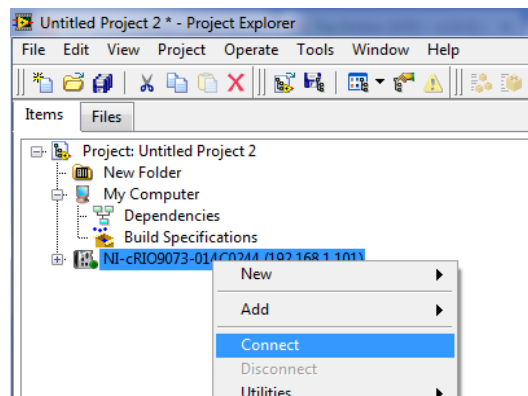
Figura 3.10. Selección de programación



Selección de programación

El chasis aparece dentro del explorador de proyecto, clic derecho sobre el nombre, como se aprecia en la Figura 3.11 seleccionar la opción conectar.

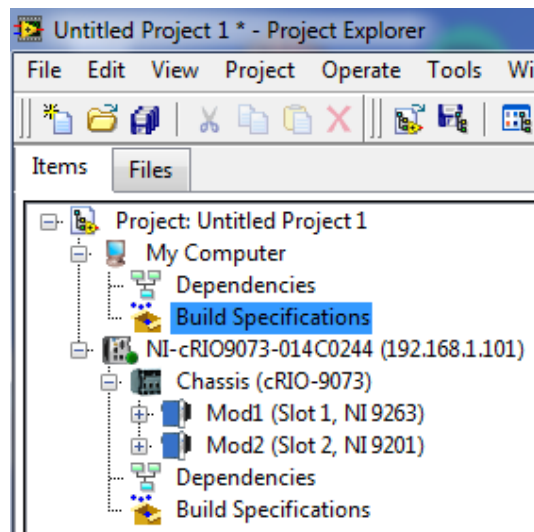
Figura 3.11. Conexión con dispositivo NI cRIO-9073



Conexión con dispositivo NI cRIO-9073

Desplegar el nombre del dispositivo para encontrar los módulos que se han detectado en este caso son dos de entrada analógica y salida analógica, como indica la Figura 3.12.

Figura 3.12 Reconocimiento de módulos



Reconocimiento de módulos

### 3.3. Identificación del modelo

Se requiere obtener, el modelo matemático del sistema compuesto por, un depósito líquido alimentado por una bomba hidráulica y una servoválvula proporcional, que balancea el caudal entre ellos.

Se empieza por obtener datos del sistema, empleando el programa LabVIEW, el cual permite una comunicación en tiempo real con el sistema.

Se realizan diferentes ensayos excitando al sistema para obtener valores de entrada y salida, estos se registran en una tabla para su posterior análisis.

En la planta se consideran como variables de entrada las mediciones del caudal, obtenidas desde el sensor, y como variable de salida se considera la apertura proporcional de la servoválvula.

En la Figura 3.13, se muestra la interfaz creada en LabVIEW para visualizar los datos de entrada y salida escalada del sistema.

Figura 3.13. Interfaz para visualizar datos de entradas y salidas



Interfaz para visualizar datos de entradas y salidas

A continuación, se presenta el registro de algunos datos, en la Tabla 3.1.

Tabla 3.1. Registro de datos de entrada y salida de la planta

	A	B
	Entrada	Salida
	Number	Number
94570	75	75.8900
94571	75	75.8900
94572	75	75.8900
94573	75	75.8900
94574	75	75.8900
94575	75	75.8900
94576	75	75.8900
94577	75	75.8900
94578	75	75.8900
94579	75	75.8900
94580	75	75.8900
94581	75	75.8900
94582	75	75.8900
94583	75	75.8900
94584	75	75.8900
94585	75	75.8900
94586	75	75.8900
94587	75	75.8900
94588	75	75.8900
94589	75	75.8900
94590	75	75.8900
94591	75	75.8900

Registro de datos de entrada y salida

### 3.3.1. Ident de Matlab

La aplicación de identificación del sistema permite identificar modelos de sistemas dinámicos a partir de datos medidos de entrada-salida.

El primer pasó, es importar los datos, a través de la opción *import data* desde el menú *home*, como se muestra en la Figura 3.14.

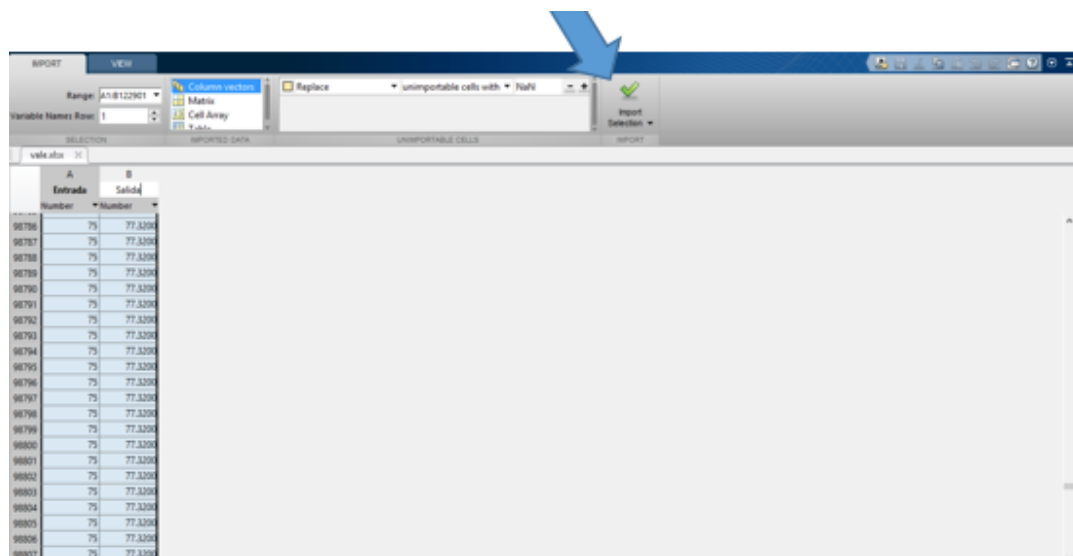
Figura 3.14. Selección de icono Import Data



Selección de icono Import Data

En la Figura 3.15, se muestran los valores experimentales de Entrada y Salida, se selecciona *input selection*, para importar estos valores y así usarlos desde el System Identification Tool de MatLab.

Figura 3.15. Valores experimentales de Entrada y Salida

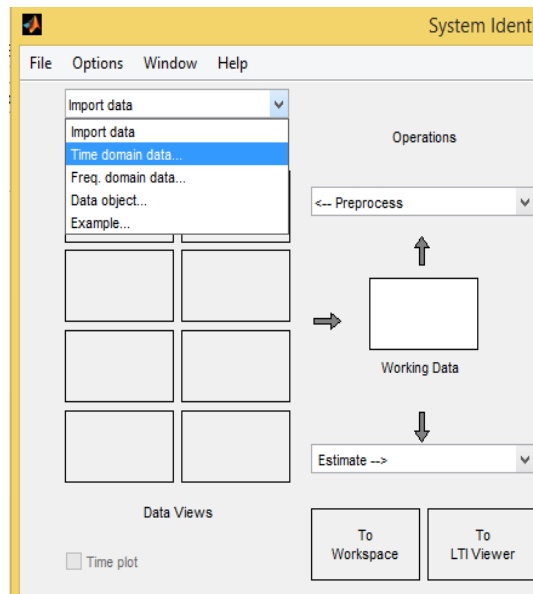


Valores experimentales de Entrada y Salida

Se emplea la herramienta de interfaz gráfico de MATLAB, la identificación del sistema a controlar inicia digitando, el comando *ident* en el *command windows*.

Se inicia la herramienta de identificación de sistema, como se muestra en la Figura 3.16. Se selecciona *import data* a continuación, se despliega un submenú y se escoge la opción *time domain data*.

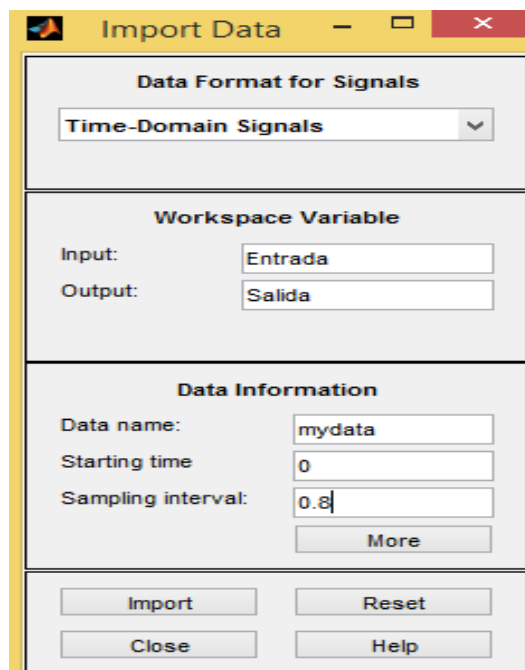
Figura 3.16. Herramienta de identificación de sistema



Herramienta de identificación de sistema

Se despliega una nueva ventana como se muestra en la Figura 3.17, la cual tiene las opciones para configurar los datos de importación de entrada y salida.

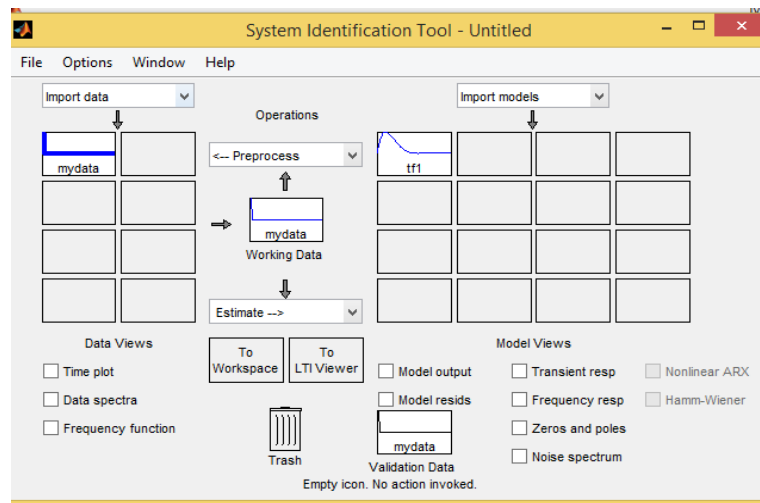
Figura 3.17. Ventana de configuración de entrada y salidas



Ventana de configuración

Al hacer clic en *import*, estos datos que se importaron se registran en *data views*, como datos iniciales de trabajo, *working data* y datos de validación como *validation data*, los cuales se muestran en la Figura 3.18.

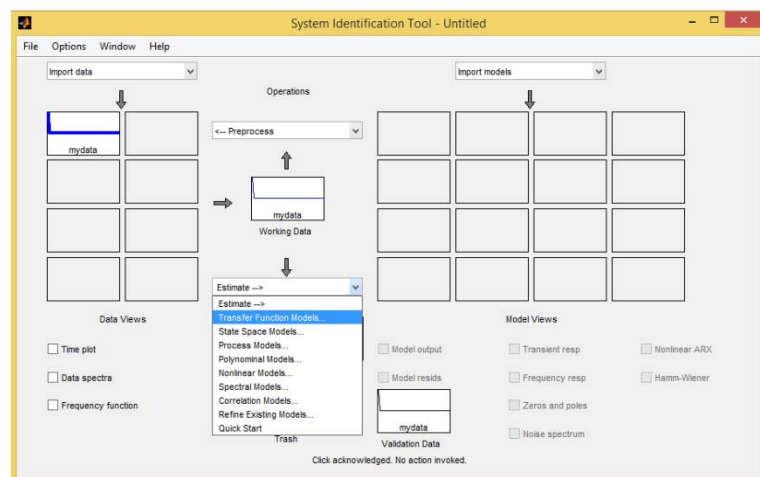
Figura 3.18. Se muestra la ubicación de los datos almacenados



Ubicación de los datos almacenados

Definidos los parámetros necesarios, se procede a realizar una estimación del modelo al desplegar el submenú *estimate*, como se muestra en la Figura 3.19, se selecciona la opción *transfer function models*.

Figura 3.19. Selección de modelo de función de transferencia



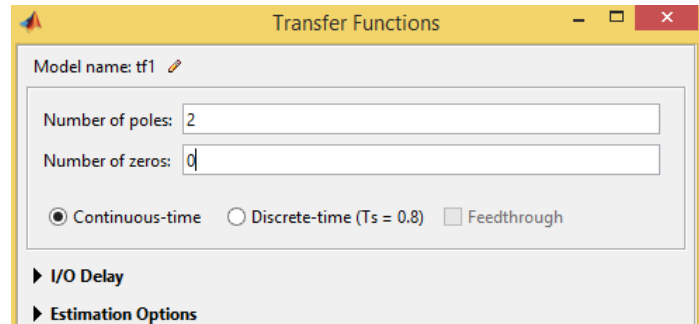
Selección de modelo de función de transferencia

Se puede obtener resultados que no son los esperados, para lo cual se siguen los pasos mencionados con anterioridad para obtener un modelo del sistema que más se aproxime a los datos de validación.



En la Figura 3.20, se muestra la ventana de configuración de la función de transferencia, en la cual se coloca el número de polos y el número de ceros del modelo de función de transferencia que se desea obtener.

Figura 3.20. Configuración de la función de transferencia



Configuración de la función de transferencia

Se presiona el botón *estimate*, para obtener un modelo matemático que cumple con la respuesta cinemática del sistema, la cual se ilustra en la, Ecuación 3.1.

$$G = \frac{1.33}{s^2 + 2.182 s + 1.239} \quad \text{Ec. (3.1)}$$

### 3.4. Desarrollo del algoritmo GPC en Matlab

Se da una descripción breve de cada comando empleado en la implementación del código, para la conversión de un algoritmo GPC a un Bloque de diseño MPC.

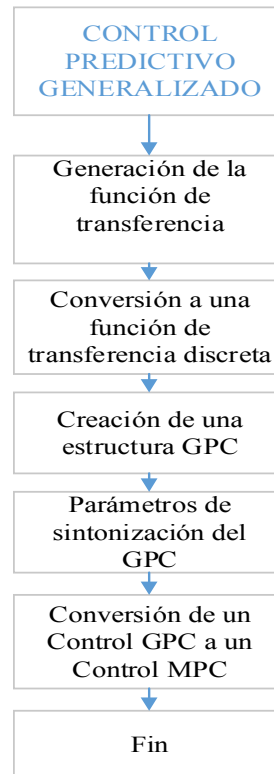
Tabla 3.2. Descripción de comandos

Comando	Descripción
<code>mpc = gpc2mpc(plant)</code>	Genera un controlador MPC SISO con configuración del controlador GPC predeterminada con un tiempo de muestreo de la planta.
<code>gpcOptions = gpc2mpc</code>	Construye una estructura que <code>gpcOptions</code> la cual contiene los valores preestablecidos de la configuración del GPC.
<code>mpc = gpc2mpc(plant,gpcOptions)</code>	Genera un controlador MPC usando la configuración GPC en <code>gpcOptions</code> .

Descripción de comandos

En la Figura 3.21, se muestra, el flujograma del algoritmo GPC en MATLAB

Figura 3.21. Flujograma del algoritmo GPC en MATLAB

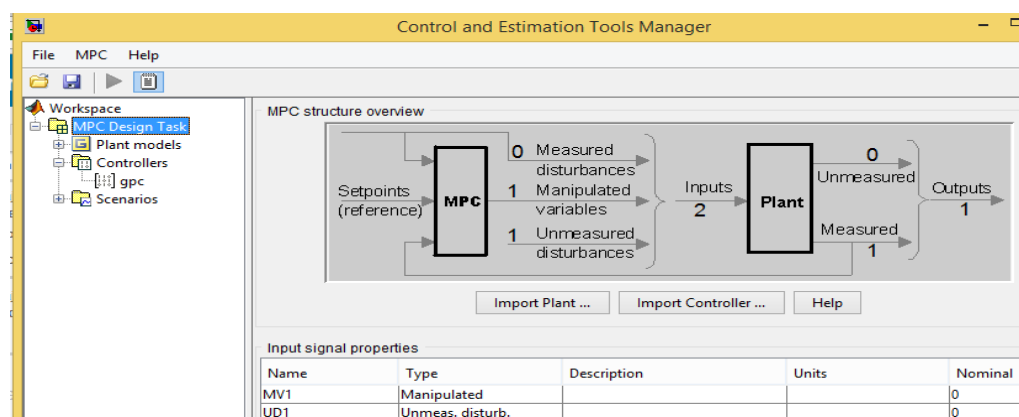


Flujograma del algoritmo GPC en MATLAB.

### 3.4.1. Creación del Bloque MPC Desing

En la Figura 3.22, se muestra la herramienta de, administrador de control y estimación, al que se ingresa desde la pestaña *apps*, ubicada en la barra de menú de MATLAB. Se selecciona la opción de *mpc design*.

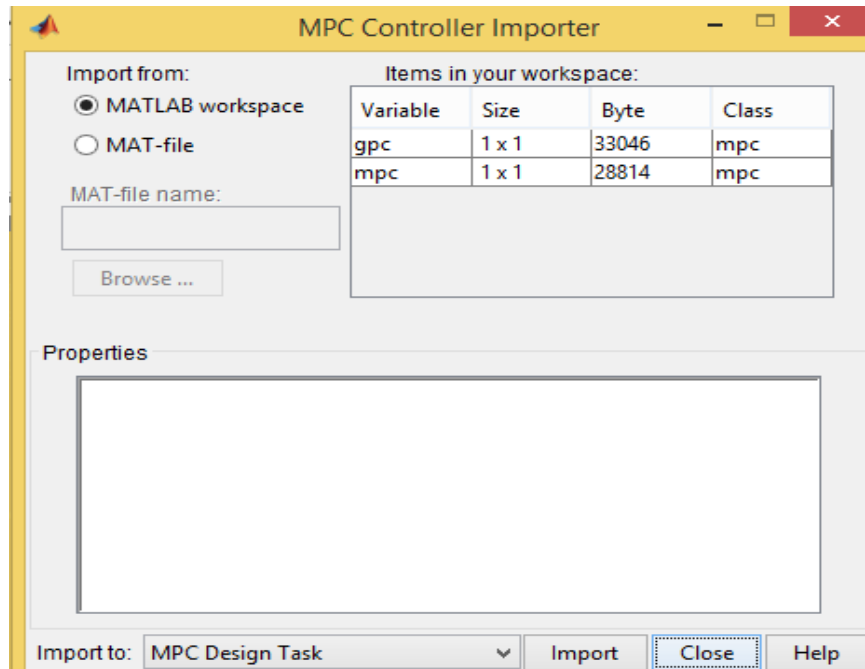
Figura 3.22. Creación de bloque MPC Design



Creación de bloque MPC Design.

En la ventana anterior se selecciona la opción, *import controller*, donde se escoge la variable GPC para importarla como se muestra en la Figura 3.23.

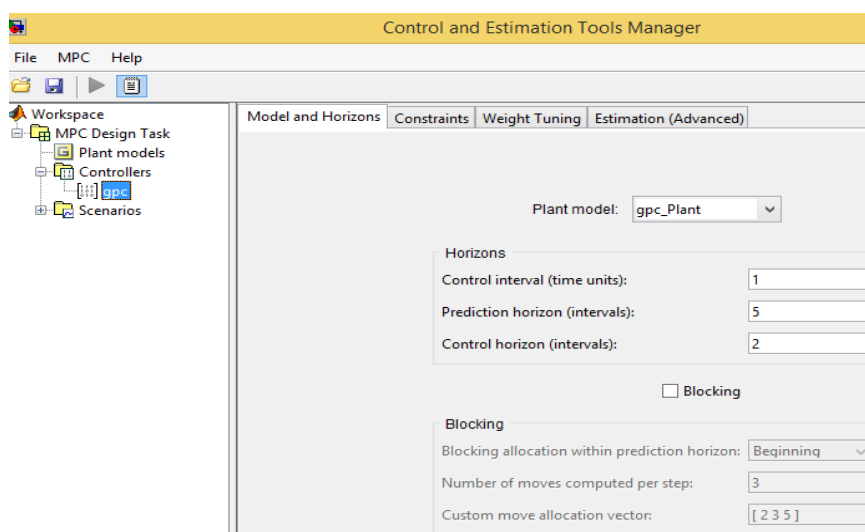
Figura 3.23. Selección de la variable GPC



Selección de variable GPC.

En la pestaña *model and horizons*, como se muestra en la Figura 3.24, las variables ingresadas en el código del Script anteriormente detallado.

Figura 3.24. Variables a emplear

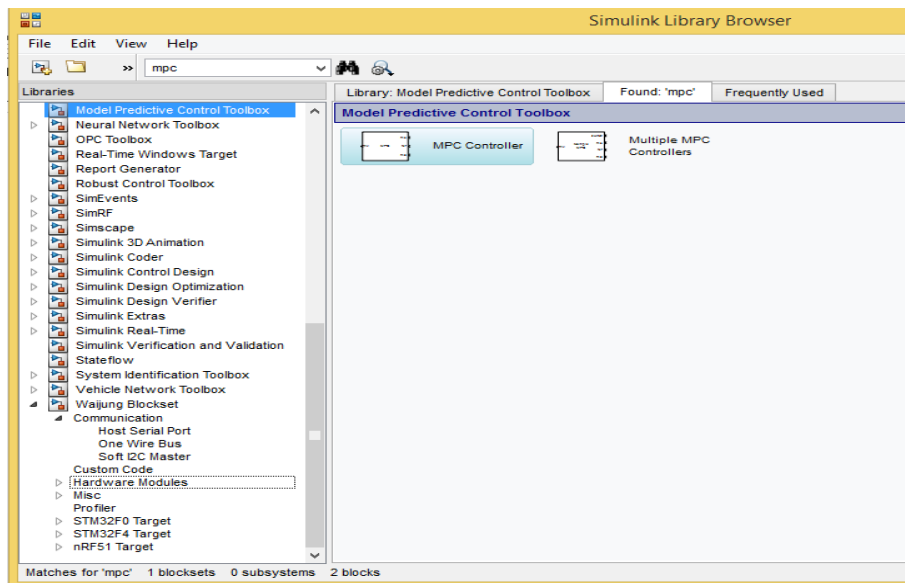


Variables a emplear

### 3.5. Simulación del modelo con el algoritmo

En la librería de simulink se selecciona la pestaña de *model predictive control toolbox* y se arrastra el ícono de *mpc controller* hacia la pantalla de programación, como se muestran en las Figura 3.25 y Figura 3.26.

Figura 3.25. Anexo de MPC Controller a pantalla de programación



Anexo de MPC Controller a pantalla de programación

Figura 3.26. Diagrama de bloques de programación

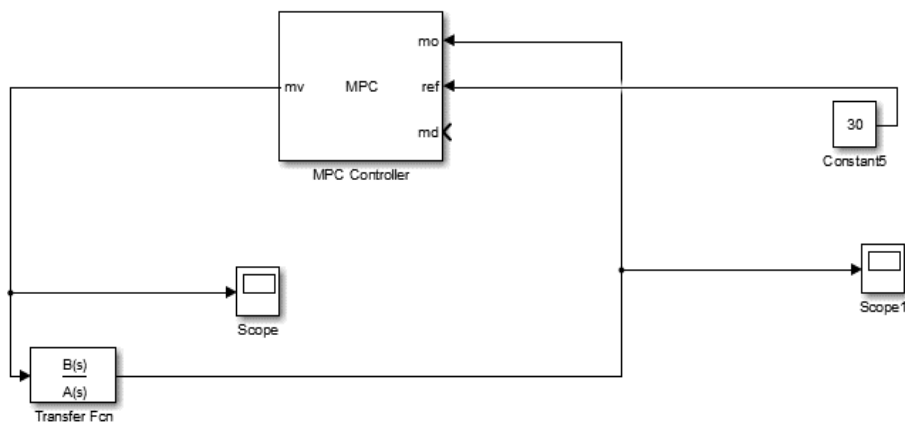
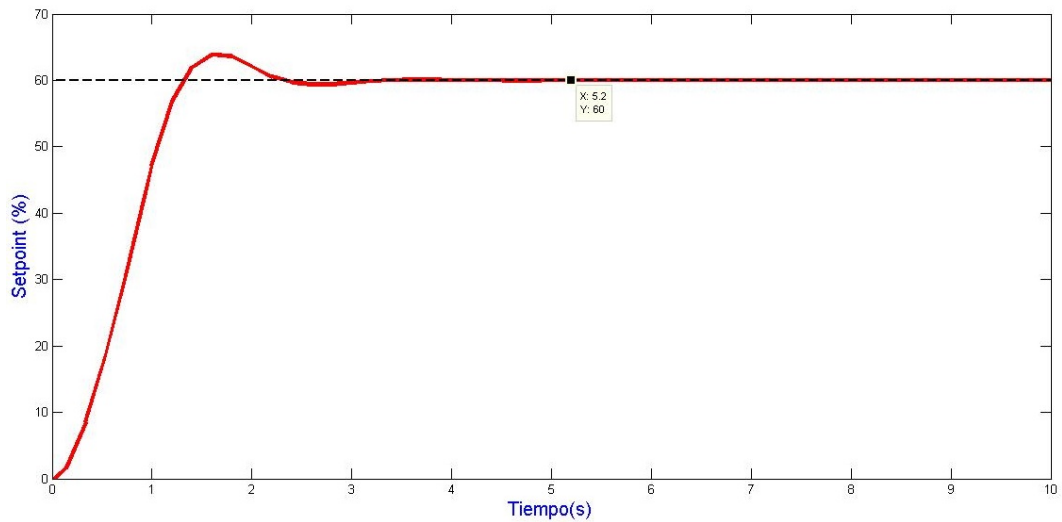


Diagrama de bloque de programación

A continuación, se muestra en la Figura 3.27, la señal simulada de salida de caudal con valor determinado de 60% en la salida, se observa como la señal tiende a establecerse en el valor de consigna.

Figura 3.27. Simulación de señal de salida con un Set Point de 60%



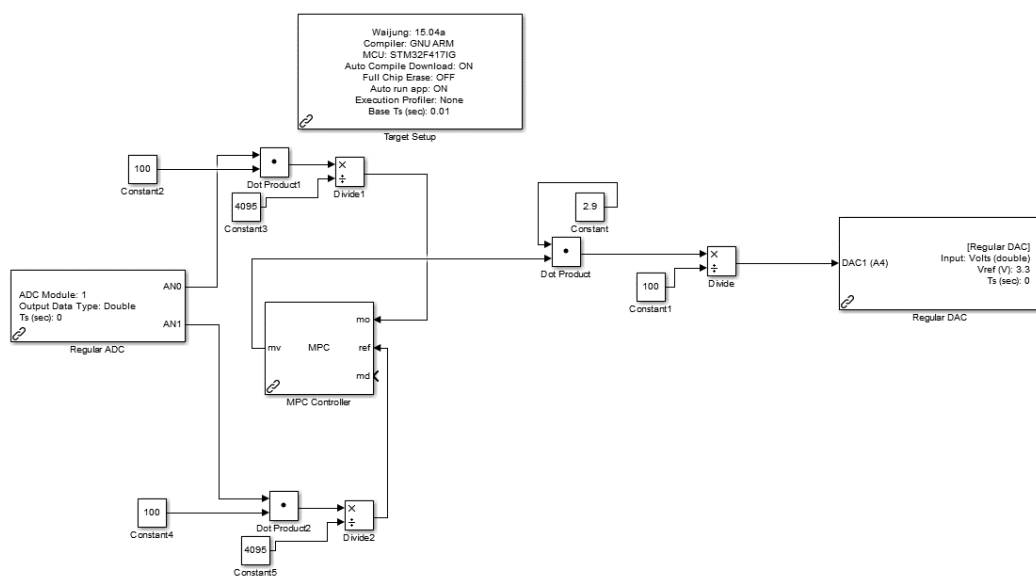
Simulación con un Set Point de 60%

### 3.5.1. Desarrollo del algoritmo implementado

A continuación, se muestran los pasos para realizar la instalación del software.

Una vez que se cuenta con las librerías, se procede a realizar el circuito de bloques con el escalamiento adecuado, tanto para el bloque ADC como para el bloque DAC, el bloque del MPC está cargado con el algoritmo del script, utilizado para la simulación anteriormente detallada, el cual se visualiza en la siguiente Figura 3.28:

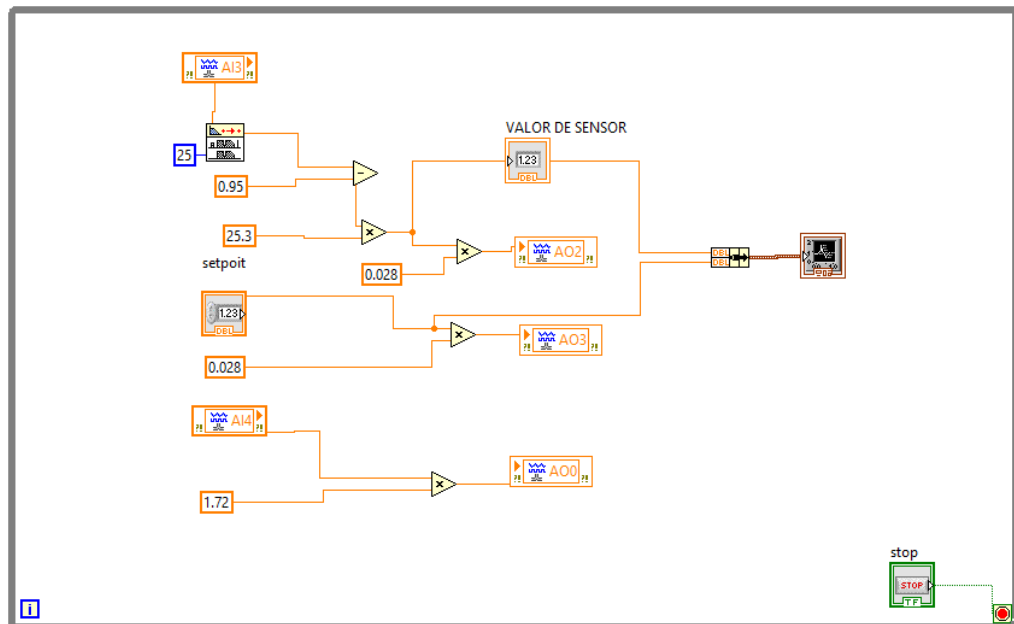
Figura 3.28. Bloque MPC con carga de algoritmo



Bloque MPC con carga de algoritmo.

Escalamiento de entradas y salidas de los módulos del PAC cRIO-9073, en LabVIEW para la comunicación con las entradas y salidas de la tarjeta STM32F4 DISCOVERY, como muestra la Figura 3.29.

Figura 3.29. Escalamiento de entradas y salidas



Escalamiento de entradas y salida.

### 3.6. Descripción del HMI

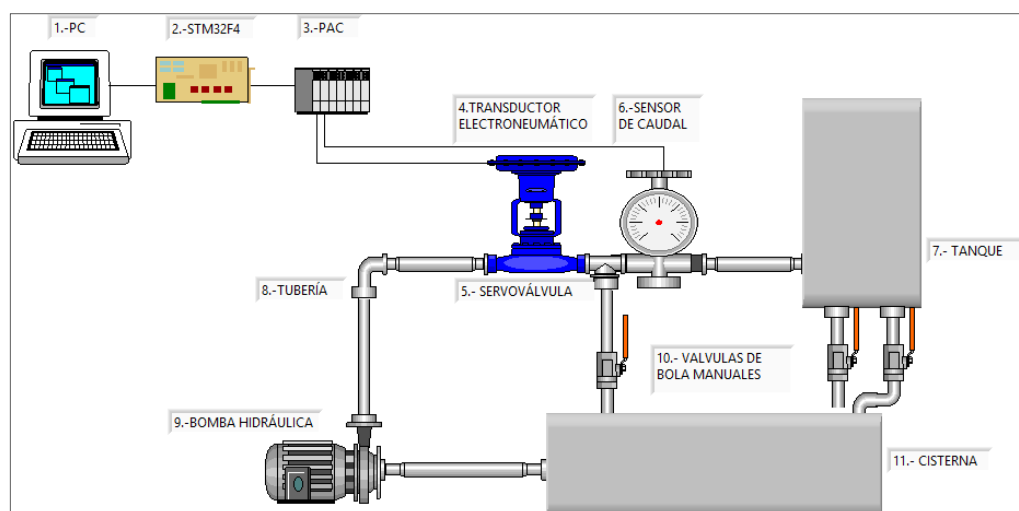
En la PC se realiza la programación del algoritmo predictivo generalizado en la plataforma de Matlab/Simulink, esta información es enviada a una tarjeta STM32F4 discovery, la cual se comunica con el PAC mediante LabVIEW.

La bomba hidráulica al estar en accionada envía agua a través de la tubería la cual debe pasar por el actuador, en este caso el valor en porcentaje del Set Point será el dato que se envíe al transductor electro neumático, este mandará una cierta cantidad de aire a la servoválvula para permitir el paso o cierre de agua, entre la servoválvula y el sensor de caudal existe una tubería que consta de una válvula de bola manual la cual se puede abrir para generar una perturbación al sistema.

El sensor de caudal funciona en un rango de corriente de 4 a 20mA, que variará según la cantidad de agua que deje circular la servoválvula, el agua ingresara a un tanque donde en su parte inferior se encuentran ubicadas dos tuberías, cada una con

una válvula de bola manual, las cuales se encontraran abiertas en su totalidad por el motivo que no se desea llenar ese tanque, sino que el agua fluya hacia la cisterna para que la bomba hidráulica no se quede sin suministro de agua en ningún momento. En la Figura 3.30, Se muestra una interfaz donde se visualiza todos los elementos que son utilizados en el proceso de control predictivo generalizado

Figura 3.30. Elementos que intervienen en el proceso de control



Elementos que intervienen en el proceso de control

En la Tabla 3.3 se muestra la ubicación y nombres de cada elemento que interviene en el sistema de control.

Tabla 3.3. Ubicación de elementos

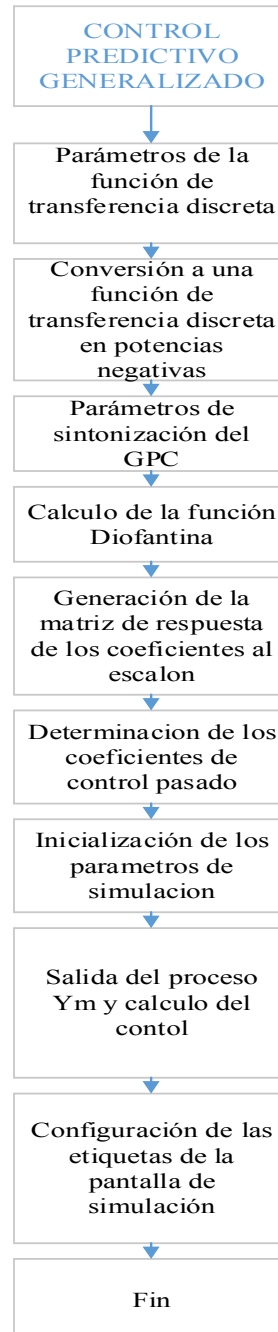
ELEMENTO	DETALLE
PC	Computador con software LabVIEW y MATLAB.
Tarjeta STM32F4	Obtiene valores de entrada y salida en tiempo real.
PAC	Sistema embebido que emplea módulos de entradas y salidas analógicas.
Transductor electro neumático	Convierte señal de entrada corriente en señal de salida neumática.
Servoválvula	Convierte señales eléctricas en caudal o presión.
Sensor de Caudal	Su funcionamiento se basa en la diferencia de presiones entre dos tuberías.
Tanque	Deposito rectangular en el que se realizan procesos de nivel y temperatura de agua.
Tubería	Tubería metálica.
Bomba hidráulica	Fuente 115/230V, potencia 0.5HP.
Válvulas de bola manuales	Abiertas simulan perturbaciones externas al sistema.
Cisterna	Se encuentra el depósito de agua.

Ubicación de elementos

### 3.7. Simulación de algoritmo GPC

En la Figura 3.31, se muestra el flujograma para realizar la simulación del algoritmo.

Figura 3.31. Flujograma de algoritmo GPC



Flujograma de algoritmo GPC.



## CAPÍTULO 4

### PRUEBAS Y RESULTADOS

En el presente capítulo se presenta la adquisición de datos en tiempo real con la planta y el controlador de automatización programable, para realizar pruebas de funcionamiento y obtener resultados.

#### 4.1. Interfaz gráfica

En la Figura 4.1 se muestra la interfaz gráfica, diseñada para observar los valores de entrada desde el transmisor de densidad de caudal, y salida del transductor electroneumático, así como del valor correspondiente en el Set Point.

Figura 4.1. Interfaz gráfica para observar los valores de entrada y salida



Interfaz gráfica para observar los valores de entrada y salida

#### 4.2. Adquisición de datos

En la Figura 4.2 se muestra el algoritmo empleado para obtener mediciones con la computadora de los fenómenos eléctricos como voltaje o corriente. Los valores de entrada del transmisor de densidad son adquiridos a través del módulo NI 9201, representado por el bloque AI3, (Entrada Análoga 3) en LabVIEW. Este módulo se configura por programación para recoger 25 muestras, se realiza un escalamiento

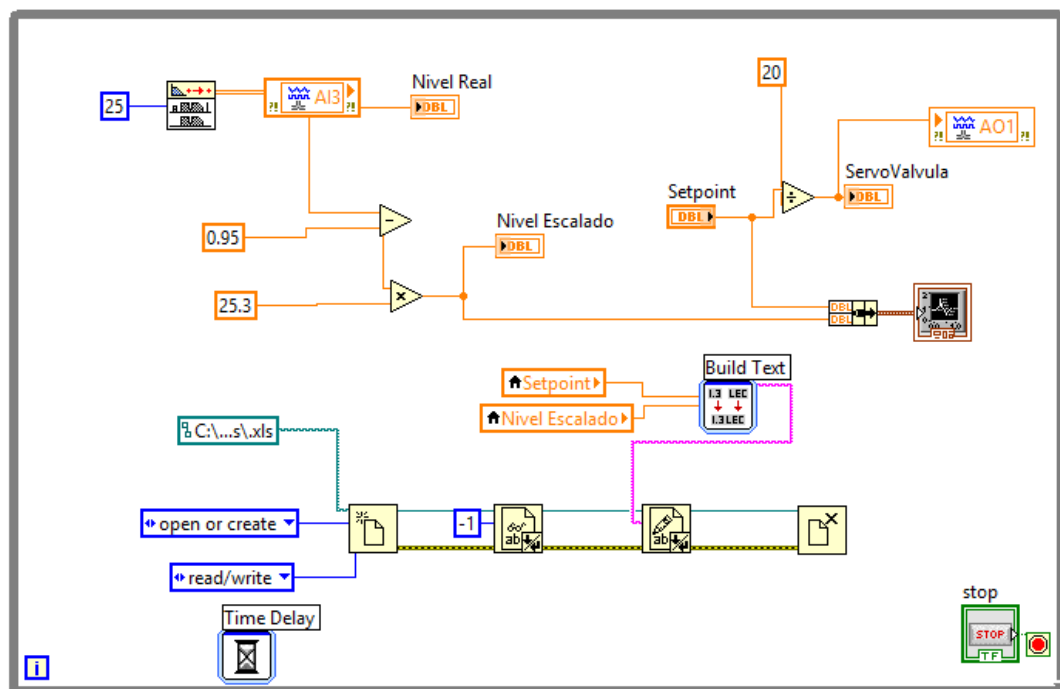
acorde al rango de valores que se desea obtener, en este caso de 0% a 100%, esto debido a la resolución que emplean estos módulos, este dato es guardado en la variable Nivel Escalado.

Este valor final es entregado al transductor electroneumático representado por el bloque AOI, (Salida Análoga 1) en LabVIEW, se hace brevemente una comparación con el valor seteado en el Set Point, y este valor se visualiza en la variable Servovalvula.

Los valores de *nivel escalado* y *Set Point*, se envían al *graph* (grafico), para constatar que no exista variación entre el valor seteado y el valor medido, como se observó en la interfaz gráfica de la Figura 4.1.

Finalmente, estos valores se almacenan en un documento de Excel para posteriormente obtener la función de transferencia que más se ajuste a la dinámica del sistema.

Figura 4.2. Algoritmo para registrar valores de entrada y salida del proceso



Algoritmo para registrar valores de entrada y salida del proceso.

#### 4.3. Modelo de función de transferencia

Con los datos obtenidos de entrada y salida es posible obtener un modelo matemático que más se aproxime con la cinemática del sistema, se empieza por emplear el software de Matlab, dentro del algoritmo se especifican los parámetros del GPC.

Horizonte de control = 2, Horizonte de predicción = 5, Valor de  $\lambda = 0$ .

Obteniendo la siguiente ecuación, de función de transferencia continua.

$$G = \frac{1.33}{s^2 + 2.182s + 1.239} \quad \text{Ec. (4.1)}$$

La función de transferencia discreta en potencias negativas que se usara para representar el modelo Carima es la siguiente:

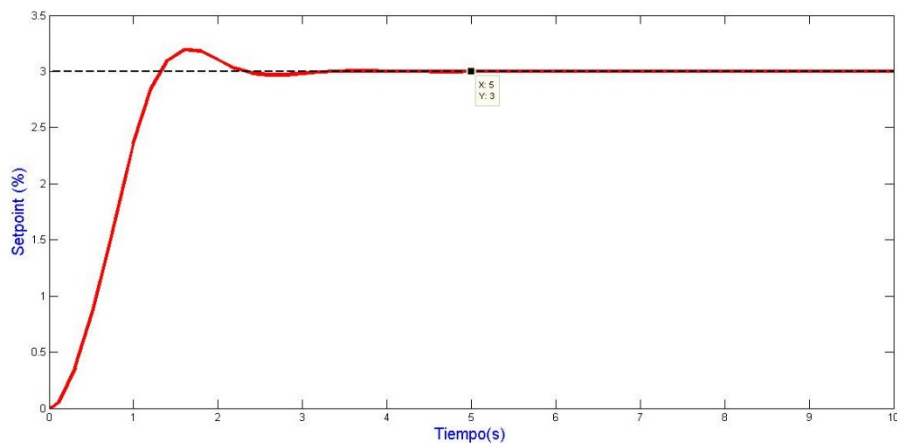
$$G(Z^{-1}) = \frac{0.3315 + 0.1595Z^{-1}}{1 - 0.6555Z^{-1} + 0.1128Z^{-2}} \quad \text{Ec. (4.2)}$$

#### 4.4. Registro de señales de salida

A continuación, se muestran las respuestas del sistema al establecer diferentes valores de consigna.

En la Figura 4.3, se muestra la respuesta del sistema, en un valor de 3% como Set Point. Se observa que el tiempo de establecimiento en X (tiempo), es de 5 segundos mientras que el valor de Y (Set Point) es de 3%.

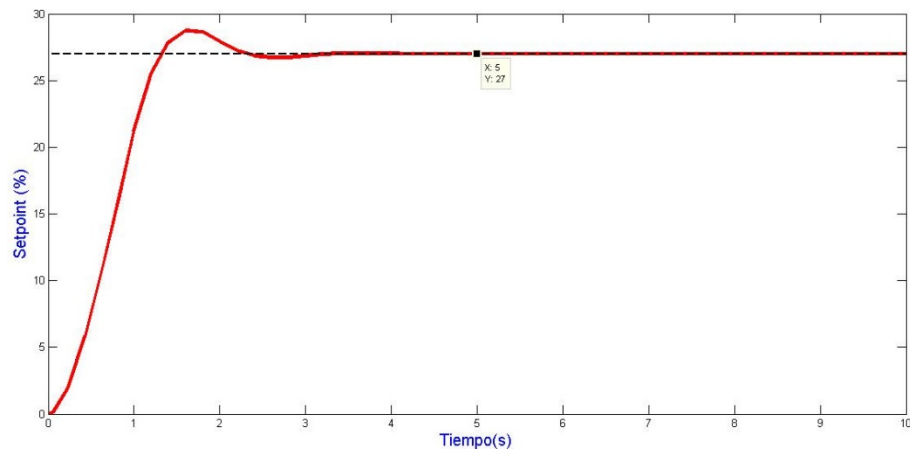
Figura 4.3. Señal de respuesta con Set Point de 3%



Señal de respuesta con Set Point de 3%

En la Figura 4.4, se observa la respuesta del sistema, en un valor de 27% como Set Point. Se observa que el tiempo de establecimiento en X (tiempo), es de 5 segundos mientras que el valor de Y (Set Point) es de 27%.

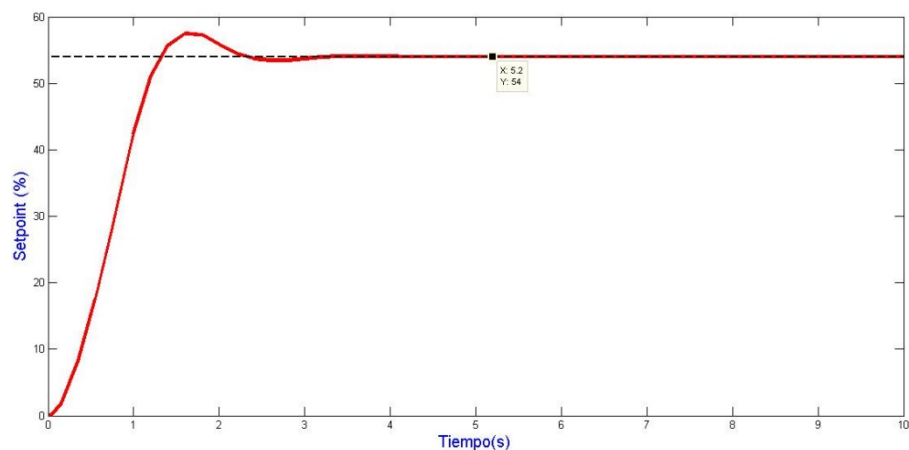
Figura 4.4. Señal de respuesta con Set Point de 27%



Señal de respuesta con Set Point de 27%

Se observa, en la Figura 4.5, la respuesta del sistema, en un valor de 54% como Set Point. Con un tiempo de establecimiento en X (tiempo), de 5.2 s mientras que el valor de Y (Set Point) es de 54%.

Figura 4.5. Señal de respuesta con Set Point de 54%



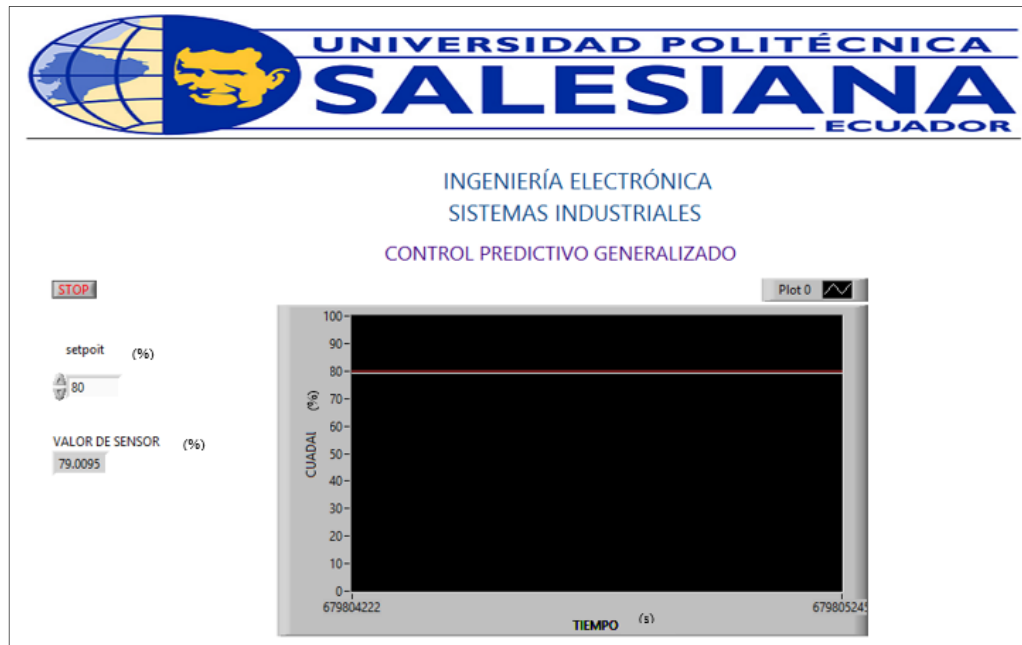
Señal de respuesta con Set Point de 54%

#### 4.5. Comparación de señales simuladas vs tiempo real

En todo proceso la adquisición de datos mediante tarjetas, software, sensores y demás instrumentos, que permitan medir los fenómenos físicos y químicos del sistema se tendrá una variación con respecto a sus mediciones.

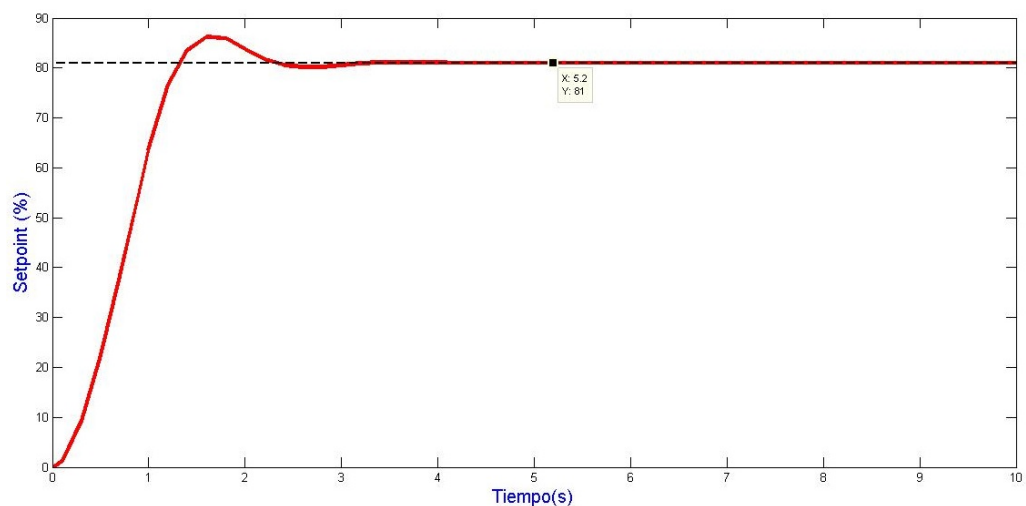
En las siguientes gráficas, Figura 4.6 y Figura 4.7, se muestra la comparación del proceso de caudal en tiempo real vs simulación.

Figura 4.6. Respuesta del sistema con Set Point de 80 en tiempo real



Respuesta del sistema con Set Point de 80% en tiempo real.

Figura 4.7. Respuesta del sistema simulado con Set Point en 81%



Respuesta del sistema simulado con Set Point en 81%.

#### 4.6. Análisis de índices de desempeño

La Tabla 4.1, muestra los valores obtenidos con diferentes señales de consigna, manteniendo constantes los valores de horizonte de predicción, control y  $\lambda$ .

Tabla 4.1. Registro de índices de desempeño con  $\lambda=0$

N	Horizonte Predicción	Horizonte Control	Set Point	Mp (%)	Ts (s)	Ym	Ess	IEA
1	5	2	3	19.23	5.0	3.1923	19.23	378.0552
2	5	2	6	39.46	5.2	6.3946	39.46	356.1104
3	5	2	9	59.09	5.2	9.5909	59.09	334.1656
4	5	2	12	76.92	4.2	12.7692	76.92	312.2208
5	5	2	15	96.15	4.2	15.9615	96.15	290.2759
6	5	2	18	115.38	4.2	19.1538	115.38	268.3311
7	5	2	21	134.61	5.0	22.3461	134.61	246.3863
8	5	2	24	153.84	5.0	25.5384	153.84	224.4415
9	5	2	27	173.07	5.0	28.7307	173.07	202.4967
10	5	2	30	192.30	5.0	31.9230	192.30	180.5519
11	5	2	33	211.53	5.0	35.1153	211.53	158.6071
12	5	2	36	232.18	5.2	38.3218	232.18	136.6623
13	5	2	39	219.89	5.2	41.1989	219.89	114.7174
14	5	2	42	278.30	5.2	44.7830	278.30	92.7726
15	5	2	45	295.44	5.2	47.9544	295.44	70.8278
16	5	2	48	309.59	5.2	51.0959	309.59	46.7601
17	5	2	51	322.69	5.2	54.2269	322.69	25.5915
18	5	2	54	346.14	5.2	57.4614	346.14	60.2406
19	5	2	57	365.37	5.2	60.6537	365.37	38.8415
20	5	2	60	384.60	5.2	63.8460	384.60	54.0512
21	5	2	63	403.83	5.2	67.0383	403.83	71.7538
22	5	2	66	423.06	5.2	70.2306	423.06	89.4563
23	5	2	69	442.29	5.2	73.4229	442.29	107.1588
24	5	2	72	461.52	5.2	76.6152	461.52	124.8613
25	5	2	75	480.75	5.2	79.8075	480.75	142.5647
26	5	2	78	499.98	5.2	82.9998	499.98	160.2673
27	5	2	81	519.21	5.2	86.1921	519.21	177.9699
28	5	2	84	538.44	5.2	89.3844	538.44	195.6725
29	5	2	87	557.67	5.2	92.5767	557.67	213.3748
30	5	2	90	576.90	5.2	95.7690	576.90	231.0769

Registro de índices de desempeño con  $\lambda=0$

La Tabla 4.1, indica el tiempo de establecimiento del sistema alrededor de 5 s.

A continuación, se muestra en la Tabla 4.2, un segundo análisis, con un parámetro de sincronización de  $\lambda = 1$ .

Tabla 4.2. Registro de índices de desempeño con  $\lambda=1$

<b>N</b>	<b>Horizonte Predicción</b>	<b>Horizonte Control</b>	<b>Set Point</b>	<b>Mp (%)</b>	<b>Ts (s)</b>	<b>Ym</b>	<b>Ess</b>	<b>IEA</b>
1	5	2	3	3.22	11.8	3.0322	3.22	987.2975
2	5	2	6	6.44	12.8	6.0644	6.44	924.5950
3	5	2	9	9.66	13.4	9.0966	9.66	861.8925
4	5	2	12	12.75	9.4	12.1275	12.75	799.1900
5	5	2	15	16.10	9.8	15.1610	16.10	736.4874
6	5	2	18	19.31	9.8	18.1931	19.31	673.7850
7	5	2	21	22.53	9.8	21.2253	22.53	611.0827
8	5	2	24	25.75	9.8	24.2575	25.75	548.3802
9	5	2	27	28.68	11.4	27.2868	28.68	485.6777
10	5	2	30	31.87	11.8	30.3187	31.87	422.9752
11	5	2	33	35.41	12.0	33.3541	35.41	360.2727
12	5	2	36	38.63	12.4	36.3863	38.63	297.5701
13	5	2	39	41.85	12.4	39.4185	41.85	234.8676
14	5	2	42	45.07	12.4	42.4507	45.07	172.1651
15	5	2	45	48.29	12.4	45.4829	48.29	109.4626
16	5	2	48	51.50	12.8	48.5150	51.50	48.8830
17	5	2	51	54.72	12.8	51.5472	54.72	43.0051
18	5	2	54	57.94	12.8	54.5794	57.94	83.6381
19	5	2	57	61.16	12.8	57.6116	61.16	77.4762
20	5	2	60	64.38	12.8	60.6438	64.38	94.7118
21	5	2	63	67.60	12.8	63.6760	67.60	111.9474
22	5	2	66	70.82	13.0	66.7082	70.82	132.7859
23	5	2	69	74.04	13.0	69.7404	74.04	154.7307
24	5	2	72	77.25	13.0	72.7725	77.25	176.6755
25	5	2	75	80.48	13.0	75.8048	80.48	198.6203
26	5	2	78	83.70	13.0	78.8370	83.70	220.5651
27	5	2	81	86.91	13.4	81.8691	86.91	242.5099
28	5	2	84	90.13	13.4	84.9013	90.13	264.4547
29	5	2	87	93.35	13.4	87.9335	93.35	286.3995
30	5	2	90	96.57	13.4	90.9657	96.57	308.3444

Registro de índices de desempeño con  $\lambda=1$

La Tabla 4.2, indica el tiempo de establecimiento del sistema alrededor de 13 s.

#### 4.7. Prueba de Wilcoxon

Para realizar la prueba de Wilcoxon se compara los índices de desempeño IEA entre ambas variaciones de los pesos de  $\lambda=0$  y  $\lambda=1$ , como indica la Tabla 4.3.

Tabla 4.3. Prueba de Wilcoxon

N	IEA ( $\lambda = 1$ )	IEA ( $\lambda = 0$ )	DIFERENCIAS	RANGOS ASIGNADOS	DIFERENCIAS ORDENADAS	RANGO DE ORDEN	T+
1	987.2975	378.0552	609.2423	30	2.1229	1	465
2	924.5950	356.1104	568.4846	29	17.4136	2	
3	861.8925	334.1656	527.7269	28	23.3975	3	
4	799.1900	312.2208	486.9692	27	38.6347	4	
5	736.4874	290.2759	446.2115	26	38.6348	5	
6	673.7850	268.3311	405.4539	25	40.1936	6	
7	611.0827	246.3863	364.6964	24	40.6606	7	
8	548.3802	224.4415	323.9387	23	43.3296	8	
9	485.6777	202.4967	283.1810	22	47.5719	9	
10	422.9752	180.5519	242.4233	21	51.8142	10	
11	360.2727	158.6071	201.6656	20	56.0556	11	
12	297.5701	136.6623	160.9078	19	60.2978	12	
13	234.8676	114.7174	120.1502	18	64.5400	13	
14	172.1651	92.7726	79.3925	17	68.7822	14	
15	109.4626	70.8278	38.6348	5	73.0247	15	
16	48.8830	46.7601	2.1229	1	77.2675	16	
17	43.0051	25.5915	17.4136	2	79.3925	17	
18	83.6381	60.2406	23.3975	3	120.1502	18	
19	77.4762	38.8415	38.6347	4	160.9078	19	
20	94.7118	54.0512	40.6606	7	201.6656	20	
21	111.9474	71.7538	40.1936	6	242.4233	21	
22	132.7859	89.4563	43.3296	8	283.1810	22	
23	154.7307	107.1588	47.5719	9	323.9387	23	
24	176.6755	124.8613	51.8142	10	364.6964	5	
25	198.6203	142.5647	56.0556	11	405.4539	25	
26	220.5651	160.2673	60.2978	12	446.2115	26	
27	242.5099	177.9699	64.5400	13	486.9692	27	
28	264.4547	195.6725	68.7822	14	527.7269	28	
29	286.3995	213.3748	73.0247	15	568.4846	29	
30	308.3444	231.0769	77.2675	16	609.2423	30	

Prueba de Wilcoxon



En los análisis realizados se tomaron 30 muestras de datos del controlador predictivo generalizado para la variable caudal con un rango de Set Point entre 3% y 90 %. Mediante estas muestras de datos con la prueba de Wilcoxon realizado al índice de desempeño IEA, se determinará con qué valor de  $\lambda$ , es factible emplear el algoritmo para obtener mejores resultados.

La prueba de Wilcoxon determinará si el criterio de sintonía de IEA entre ambas muestras son iguales o diferentes entre sí, para el control del flujo de caudal.

Se toma en consideración lo siguiente:

Hipótesis nula ( $H_0$ ): La integral del error absoluto IEA ( $\lambda=1$ ) es igual al IEA ( $\lambda=0$ )

Hipótesis Alternativa ( $H_a$ ): La integral del error absoluto IEA ( $\lambda=1$ ) mayor al IEA ( $\lambda=0$ )

#### **4.7.1. Interpretación de resultados**

Al emplear la Ec. (2.20), se obtuvo el estadígrafo ( $Z=4.7821$ ) siendo mayor a la zona de aceptación ( $Z_a=1.96$ ), valor que se encuentra dentro del nivel de confianza del 95% ( $Z_a$ ) por lo tanto, se acepta la hipótesis alternativa.

Al ser el valor del IEA ( $\lambda=1$ ) mayor al IEA ( $\lambda=0$ ), se demuestra que se ha optimizado de mejor forma el controlador, produciendo una mayor eficiencia y disminuyendo la pérdida de energía del sistema.

## CONCLUSIONES

Se obtuvo como resultado de este proyecto, la implementación del control predictivo generalizado, comprobando su funcionamiento e eficacia, a través de pruebas de funcionamiento, y mediante índices de desempeño. Constatando así que los controladores modernos predictivos tienen un buen tiempo de respuesta.

Se analizó el principio de funcionamiento de la planta de procesos continuos, mediante la caracterización de elementos que intervienen en el proceso como son sensores y actuadores, además se enviaron señales de voltaje y corriente para estimular las entradas y salidas del sistema.

La plataforma de procesos continuos fue repotenciada, acoplando el controlador de automatización programable (PAC), el cual emplea módulos de entradas y salidas analógicas, en los cuales se conectaron: el instrumento eléctrico de medición de caudal, la servovalvula y el transductor electroneumático.

La estructura usada en el modelo del Control Predictivo Generalizado (GPC) fue la de un modelo Carima, por el motivo que para el desarrollo del algoritmo predictivo generalizado se necesita obligatoriamente un modelo que contenga una función de transferencia discreta en potencias negativas junto con un término desconocido (perturbación) representando así la función de transferencia del sistema óptima.

Se verificó el comportamiento real de la variable caudal, al registrar los datos que se obtuvieron de la señal de respuesta del sistema, para realizar el análisis mediante índices de desempeño como: tiempo de establecimiento, máximo sobreimpulso, error en estado estable e integral de error absoluto, a su vez se efectuó la prueba de Wilcoxon para comprender los resultados del Control Predictivo Generalizado.

Las entradas de la planta  $u(k)$  siempre empezará en  $u(k-1)$  debido a que el control que se calculó en el instante anterior vendrá hacer la salida actual del sistema  $y(k)$ .

Para la obtención de las predicciones futuras se utilizó las ecuaciones diofantinas, para que el cálculo de predicaciones sea de forma incremental logrando obtener la resolución del algoritmo más óptima y de manera más simple.

La respuesta del control tiende a estabilizarse en un tiempo mínimo cuando los parámetros de sintonía de  $\lambda$  y los horizontes de control y predicción son relativamente bajos, esto se demostró de forma práctica y simulada.

Se logró encontrar una secuencia de control optima llevando la variable caudal al lugar deseado en este caso el Set Point establecido en cada prueba, variando mínimamente la acción de control, donde se obtuvo como resultado el uso mínimo de energía posible con tiempos de estabilización mínimos en cada prueba.

El horizonte de predicción debe ser siempre mayor al horizonte de control ya que es el intervalo de tiempo donde se predicen las salidas, logrando que el sistema de lazo cerrado alcance el estado estable.

Al variar el valor de  $\lambda$  de 0 a 1, el comportamiento del sistema de control tiende a tener acciones de control menos bruscas en el sobre impulso, pero con un tiempo de estabilización más prolongado.

Con el uso de la tarjeta STM32F4 Discovery de alto rendimiento se logró ejecutar aplicaciones en tiempo real, realizando la comunicación entre Matlab/Simulink con las entradas y salidas análogas del PAC NI Crio-9073 previamente escaladas, logrando ejecutar el procedimiento del control de la variable caudal sin ningún inconveniente y con grandes resultados.

## RECOMENDACIONES

Se debe realizar una caracterización de la plataforma de procesos continuos para tener claro los sensores y actuadores que se van a ocupar, para evitar contratiempos al momento de querer usarlos

La plataforma de procesos continuos al no contar con planos eléctricos del conexionado, se recomienda realizar pruebas punto a punto entre los elementos eléctricos para poder realizar un diagrama sencillo del conexionado de los elementos eléctricos que se van a utilizar.

Debido a que el sensor de presión utilizado en la plataforma de procesos continuos cuenta con un tiempo de uso prolongado sin realizarse calibraciones, se recomienda enviar el sensor a un centro de calibración certificado para tener la certeza de que los datos que muestra son correctos.

Al momento de la calibración del sensor de caudal es recomendable abrir el circuito (desconectar un cable de la caja de bornes del sensor) y colocar un Amperímetro en serie para poder medir la corriente que circula, y así verificar que a 4 mA la pluma del sensor este en 0% y en 20mA la pluma este en 100%.

En el tanque de reserva de agua se debe realizar limpiezas constantes, por el motivo que el filtro que está colocado en la tubería (que conecta a la bomba hidráulica) no detiene todas las impurezas y puede causar daño en un tiempo prologado de uso a dicha bomba.

En el tanque utilizado para hacer pruebas de nivel, se recomienda tener abiertas completamente las válvulas manuales para que exista un flujo constante y así evitar que el tanque de reserva quede sin suministro hacia la bomba hidráulica.

Antes de realizar el conexionado de los módulos del PAC NI Crio-9073 se debe leer el manual de funcionamiento para entender cómo se realiza la comunicación entre el chasis y la computadora donde se ejecutará el software NI MAX junto con el de LabVIEW 2012.

Verificar que en las librerías de Simulink (Library Browser) se encuentre la librería Wainjung Blockset, si no se encuentra es recomendable desinstalarla mediante el scrip de desinstalar (Uninstall), para posteriormente guardar la carpeta de la librería Wainjung Blockset en la carpeta propia de Matlab, y ejecutar el scrip de de instalación (Install) nuevamente.

Los programas creados en Simulink que contengan los bloques de Wainjung siempre deberán ir dentro de esta misma carpeta (Wainjung Blockset), para que se pueda ejecutar la aplicación correctamente y a su vez la información se pueda cargar a la tarjeta STM32F4 Discovery.

Se recomienda variar los valores de las ponderaciones del Control Predictivo Generalizado de manera simulada, para poder verificar el comportamiento del control y así evitar que el sistema tenga altos sobre impulsos al momento de ejecutar la planta en forma real.

Para un lograr el estudio de los índices de desempeño es recomendable contar con una función de transferencia de segundo orden, por el motivo que cuenta con un Máximo pico ( $M_p$ ), que es necesario para el cálculo de dichos índices.

## REFERENCIAS

- Arnold, M., & Osorio, F. (1998). *Introducción a los Conceptos Básicos de la Teoría General de Sistemas*.
- Blockset, W. (7 de MARZO de 2017). *waijung aimagin*. Obtenido de [http://waijung.aimagin.com/index.htm?fsmc\\_sram\\_setup.htm](http://waijung.aimagin.com/index.htm?fsmc_sram_setup.htm)
- Bordons, E. F. (1999). *Model Predictive Control*. Great Britain: Springer-Verlag London Limited.
- Cuenca Tinitana, J. C. (2011). *Desarrollo de un sistema de control predictivo generalizado (GPC) de la distribución de agua en el VI tramo del canal principal de riego Güira de Melena*. Cuba: Instituto Superior Politécnico José Antonio Echeverría CUJAE.
- FISHER. (OCTUBRE de 2016). *Transductor electroneumático i2P-100 de Fisher*.
- Gaviño, R. H. (2010). *Introducción a los sistemas de control: Conceptos, aplicaciones y simulación con MATLAB*. México: Pearson.
- Gomariz, S., Biel, D., Matas, J., & Reyes, M. (1998). *Teoria de Control Diseño Electronico*. Edicions UPC.
- Hidraulica & Neumatica*. (2 de FEBRERO de 2015). Obtenido de <http://www.hnsa.com.co/servovalvulas/>
- Hidráulicas, P. I.-B. (17 de MARZO de 2017). *Hydraulics & Pneumatics*. Obtenido de <http://www.hydraulicspneumatics.com/blog/principios-ingenieriles-b-sicos-bombas-hidr-ulicas>
- INSTRUMENTS, N. (2009). *OPERATING INSTRUCTIONS AND SPECIFICATIONS*. HUNGARY: NATIONAL INSTRUMENTS CORP.
- INSTRUMENTS, N. (11 de FEBRERO de 2018). *PAC Combina la Robustez del PLC y la Funcionalidad de la PC*. Obtenido de <http://www.emerson.com/documents/automation/instruction-manual-transductor-electroneum%E1tico-i2p-100-de-fisher-fisher-i2p-100-electro-pneumatic-transducer-spanish-universal-es-125020.pdf>
- López Caisaguano, V. G., & Paredes Anchatipán, A. D. (Febrero de 2015). Diseño e implementación de un algoritmo de control predictivo para una planta de flujo utilizando un controlador de automatización programable para el

Laboratorio de Redes Industriales y Control de Procesos de la Universidad de las Fuerzas Armadas - ESPE. Latacunga, Cotopaxi, Ecuador.

Moore, D. (2000). *Estadística aplicada básica*. España: Freeman and company.

Moromenacho Oscullo, E. O., Rosero Mata, C. Z., & Bravi Narváez, Y. (Noviembre de 2009). Control predictivo en tanques acoplados. Quito, Pichincha, Ecuador.

Nise, N. S. (2011). *Control Systems Engineering*. United States of America: John Wiley & Sons, Inc.

Rodrigo, J. A. (Enero de 2016). *RPubs*. Obtenido de [https://rpubs.com/Joaquin\\_AR/218464](https://rpubs.com/Joaquin_AR/218464)

Rosemount. (6 de Enero de 2015). *emersonprocess*. Obtenido de <http://www2.emersonprocess.com/siteadmincenter/pm%20rosemount%20documents/00809-0100-4360.pdf>

Sanchez, J. (2006). *Instrumentación y Control Avanzado de Procesos*. España: Ediciones Diaz de Santos.

STMicroelectronics, f. d. (23 de DICIEMBRE de 2013). *industriaembebidahoy*. Obtenido de <https://www.industriaembebidahoy.com/kit-de-desarrollo-para-stm32f4/>

## ANEXOS

### ANEXO 1: Tabla con características técnicas de la servoválvula

Número de posiciones	Infinitas
Presión máxima	350 Bar
Flujo de caudal	5- 100 [L/min]

Tabla con características técnicas de la servoválvula, Fuente: Fisher Controls CO

### ANEXO 2: Tabla con características técnicas del transductor electroneumático

Señal de entrada	4 – 20 mA
Flujo de salida	3 – 15 PSI
Resistencia interna	176 ohm

Tabla con características técnicas del transductor electroneumático, Fuente: Fisher Controls CO

### ANEXO 3: Tabla con características técnicas del instrumento de medición de caudal

Fuente	24 VDC
Corriente de calibración	4 – 20 mA
Presión de caudal líquido máximo	±0.35%
Volumen de flujo de precisión	±0.10%

Tabla con características técnicas del transductor electroneumático, Fuente: Rosemount

### Anexo 4: Tabla con características técnicas de la bomba hidráulica

Fuente	115/230 V
Potencia	0.5 Hp
Corriente de entrada	2.5 A

Tabla con características técnicas de la bomba hidráulica, Fuente: Paolo

### Anexo 5: Tabla con características técnicas del Controlador de Automatización Programable

Fuente de alimentación	19 V a 30 V
Voltaje mínimo de entrada	5.5 V
Interfaz de red	10 Base T y 100 Base-TX Ethernet
Fuente de voltaje recomendada	48 W, 24 VDC
Bloque de RAM disponible	432 kbits



## Anexo 6

### Código de implementación del algoritmo GPC

% Generación de la función de transferencia

```
B=[0 1.33]; % B= Numerador de la función de transferencia  
A=[1 2.182 1.239]; % A= Denominador de la función de transferencia  
G=tf(B,A) % G= Función de transferencia
```

% convierte la función de transferencia G en una función discreta Gd.

```
Ts = 1;  
Gd = c2d(G, Ts);
```

% Crear una estructura de configuraciones GPC

```
GPCOptions = gpc2mpc;
```

% Especificación de la configuración de parámetros del GPC .

```
GPCOptions.NU = 4; %Horizonte de Control
```

```
GPCOptions.N2 = 10; %Horizonte de predicción
```

```
GPCOptions.Lam = 1; % Valor de Lamda
```

```
GPCOptions.T = [1 ]; %Numerador del modelo de perturbación GPC-
```

%-especificado como un vector de fila de coeficientes polinomiales cuyas raíces se encuentran dentro del círculo unitario

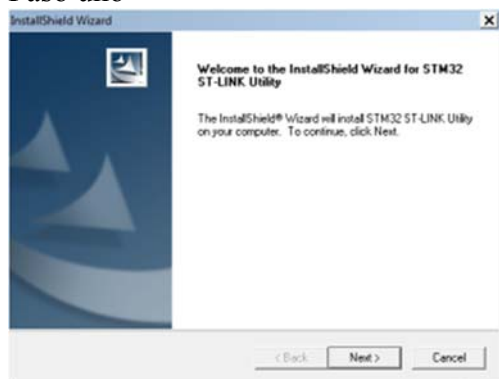
% Convierte GPC a un controlador MPC.

```
gpc = gpc2mpc(Gd, GPCOptions);
```

## Anexo 7

### Instalación del software SMT32 ST-LINK Utility\_v3.3.0

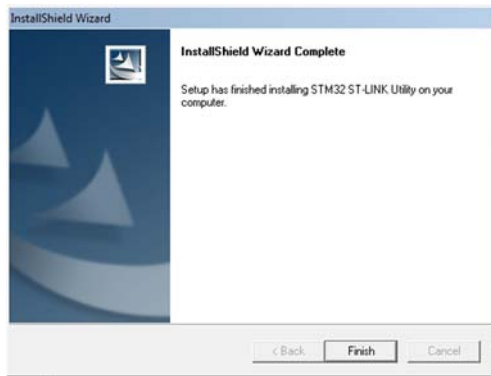
#### Paso uno



#### Paso dos



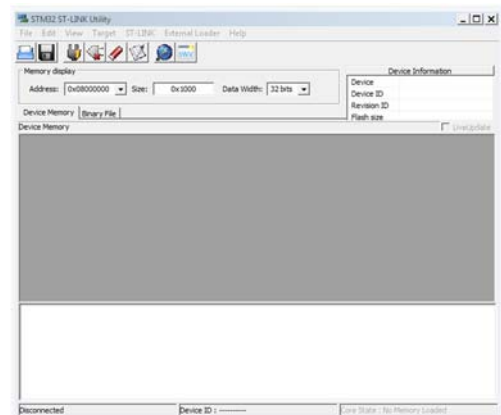
### Paso tres



### Paso cuatro



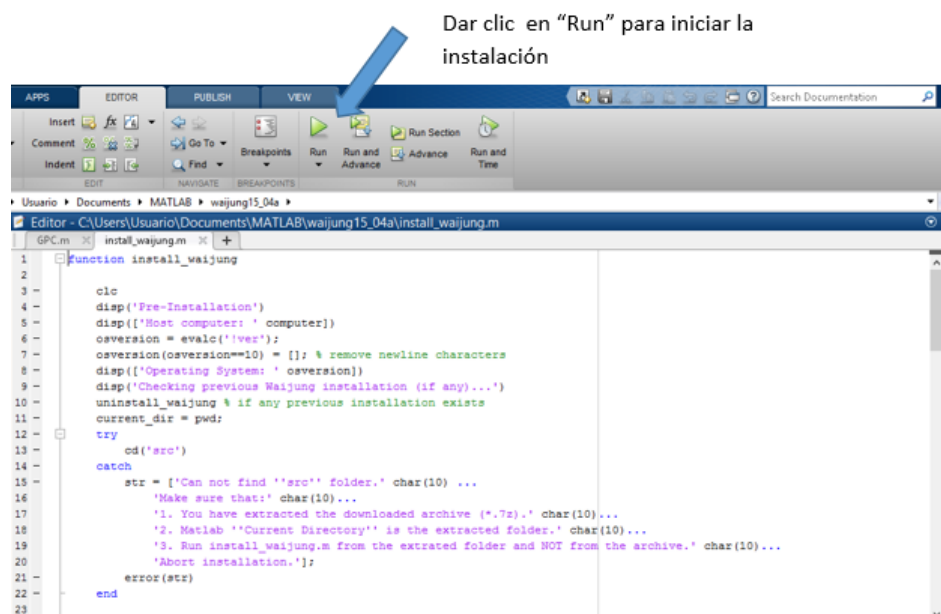
### Paso cinco



## Anexo 8

### Instalación de la librería waijung15\_04a

Para instalar la librería waijung15\_04a se debe ejecutar el script, “install\_waijung” el cual añadirá las librerías en simulink, como se muestra en la Figura.



Las librerías se cargan en el entorno de simulink como se observa en la Figura a continuación:

